

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# **ВИБІР І КОМП'ЮТЕРНИЙ ДИЗАЙН МАТЕРІАЛІВ КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра  
за освітньою програмою «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»  
спеціальності 132 «Матеріалознавство»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2021

**Вибір і комп'ютерний дизайн матеріалів:** Комп'ютерний практикум  
[Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 132  
«Матеріалознавство» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. В. Степанов,  
Ю. І. Богомол, І.М. Гурія. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,6 Мбайт). –  
Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 107 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.)  
за поданням Вченої ради Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О.Патона  
(протокол № 5/21\_ від 26.03.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## ВИБІР І КОМП'ЮТЕРНИЙ ДИЗАЙН МАТЕРІАЛІВ КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: Степанов Олег Васильович, канд. техн. наук, доц.  
Богомол Юрій Іванович, докт. техн. наук, доц.  
Гурія Ірина Миранівна, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний  
редактор Юркова Олександра Іванівна, докт. техн. наук., проф.

Рецензент Ямшинський М.М., докт техн.наук, доц., зав. кафедрою  
Ливарного виробництва чорних та кольорових металів

Дисципліна «Вибір та комп'ютерний дизайн матеріалів» має на меті формування компетентностей із застосування спеціалізованого програмного забезпечення для вирішення задач оптимального вибору матеріалів, що відповідають заданим критеріям.

В якості середовища роботи обрано систему CES Edupack. Структура комп'ютерного практикуму складена таким чином, що використовуючи його, студент має можливість поступово оволодівати інструментами пакету програм та методиками оптимального вибору матеріалів: формування цілей і обмежень, одержання індексу матеріалів, розв'язання протиріч, тощо.

До навчального посібника увійшли 5 комп'ютерних практикумів, кожен з яких містить теоретичні відомості, контрольні запитання та практичні завдання.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Техніка безпеки при роботі з комп'ютером. Правила поведінки в комп'ютерному класі.....	5
Оформлення звіту та порядок його подання .....	6
Комп'ютерний практикум 1. Призначення, структура та основи роботи з пакетом CES Edupack та засоби вибору матеріалу .....	7
Комп'ютерний практикум 2. Технологія оптимального вибору матеріалу .....	30
Комп'ютерний практикум 3. Оптимальний вибі за наявності протиріч .....	55
Комп'ютерний практикум 4. Вплив технологічних процесів .....	76
Комп'ютерний практикум 5. Оптимізація екологічної складової матеріалів та процесів .....	87
Перелік використаної літератури .....	95
Додаток 1. Повний список властивостей матеріалів (англійсько – український відповідник) .....	96
Додаток 2. Список технологічних процесів (англійсько – український ) .....	100

## Вступ

Сьогоднішній день, темпи та тенденції розвитку техніки, вимагають від інженера прийняття не просто ефективних рішень, а рішень, які є оптимальними за заданим критерієм чи системою критеріїв. Це твердження є справедливим і стосовно конструкцій, і стосовно технології, і стосовно матеріалів.

Розвиток науки і технологій у кінці XX столітті сформував ряд передумов для створення програмного забезпечення, призначеного для оптимального вибору матеріалів. По-перше: кількість відомих і доступних для використання матеріалів досягла десятків тисяч, збільшившись за останні 50-60 років не менш ніж вчетверо. По-друге: оптимальний вибір матеріалів пов'язаний з аналізом цілого ряду властивостей матеріалів та технології одержання виробів з них, серед яких, наприклад, вплив виробництва та використання матеріалу на екологію. По-третє: розвиток комп'ютерної техніки досяг рівня, коли кінцевому користувачу доступні персональні комп'ютери з колосальною обчислювальною потужністю, на які, серед іншого, можна покласти аналіз десятків тисяч матеріалів з десятками значень їх властивостей.

Як результат, фірмою Granta Design (створена в 1994 році на основі робіт університету Кембриджа, Велика Британія, з 2019 є підрозділом компанії ANSYS<sup>1</sup>) розроблено пакет програм CES – Cambridge Engineering Selector.

Даний навчальний посібник призначений для вивчення студентами технічних спеціальностей стратегії вибору матеріалів та технології такого вибору за допомогою системи CES Edupack (версія 2015, 2016 року або більш нова) – полегшеної версії, призначеної для використання в навчальних закладах.

---

<sup>1</sup> <https://www.ansys.com/products/materials>

## **Техніка безпеки при роботі з комп'ютером. Правила поведінки в комп'ютерному класі**

При роботі з програмним забезпеченням персональних комп'ютерів (ПК), необхідно пам'ятати, що настільний ПК є достатньо складним, багатокомпонентним обладнанням, що потребує акуратного й обережного ставлення, самодисципліни на всіх етапах її експлуатації.

Напруга живлення ПК (220 В) є небезпечною для життя людини. Тому, незважаючи на те, що в конструкції комп'ютера передбачена достатня ізоляція від струмопровідних ділянок, необхідно знати та чітко виконувати ряд правил техніки безпеки.

### **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ:**

- знаходитися в класі у верхньому одязі;
- класти одяг і речі на столи;
- приносити, вживати їжу та напої в комп'ютерному класі;
- класти книги, зошити та інші речі на клавіатуру, монітор і системний блок;
- працювати за комп'ютером у вологому одязі та вологими руками;
- торкатись екрана, тильного боку дисплея, проводів живлення, заземлення, з'єднувальних кабелів;
- пересувати комп'ютери і монітори, знімати кришку корпусу системного блоку;
- вмикати/вимикати комп'ютер без дозволу, від'єднувати і під'єднувати будь-які пристрої комп'ютера, порушувати порядок увімкнення й вимикання апаратних блоків;
- перекривати вентиляційні отвори на системному блоці та моніторі;
- самотійно намагатися усунути будь-які неполадки в роботі комп'ютера, незалежно від того, коли і з чиєї вини вони сталися;
- видаляти і переміщати чужі файли, приносити і запускати комп'ютерні ігри.

Під час роботи на комп'ютері:

У разі появи запаху горілого, самовільного вимикання апаратури, незвичних звуків треба негайно повідомити про це викладача і виконувати його вказівки. Інструктаж щодо виконання комп'ютерних практикумів проводиться на першому занятті і фіксується в журналі техніки безпеки.

## **Оформлення звіту та порядок його подання**

Для допуску до виконання кожного практикуму студент має підготувати протокол в який заносяться принципові положення теоретичних відомостей та завдання.

Протокол готується у вигляді текстового документу формату google docs, включає перелік завдань. Шаблон частини «Практичні завдання» може бути наданий студенту у формі вихідного тексту (дає можливість редагування) і містити відкорегований перелік завдань. Такий шаблон приєднується до підготовленого протоколу. Після кожного завдання студентом наводиться інформація, яка вичерпно характеризує ступінь розуміння і виконання завдання: графіки, таблиці, копії екрану або його частин, текстові пояснення.

Звіт оформляється згідно вимог щодо оформлення звітів, зберігається на персональному мережевому ресурсі студента. Адреса документа і права його редагування передаються для перевірки вказаним викладачем способом: google classroom, інформаційна система «Електронний кампус», засоби електронної пошти чи месенджери.

Захист попередньо схваленого звіту з комп'ютерного практикуму відбувається на одному з наступних занять.

## Комп'ютерний практикум 1.

### Призначення, структура та основи роботи з пакетом CES Edupack та засоби вибору матеріалу

**Мета практикуму:** Оволодіти інформацією про систему комп'ютерного вибору матеріалів та практично засвоїти принципи роботи з інструментами пакету CES Edupack

#### 1.1 База даних пакету CES

Пакет CES Edupack реалізовано у вигляді системи управління базами даних, що забезпечує формування запитів та аналіз результатів, в тому числі графічний. База даних сформована як система пов'язаних таблиць загальну схему якої показано на рис. 1.1. Ядро системи складають таблиці матеріалів (Material Universe) та процесів (Process Universe), які мають розгалужену структуру. Решта таблиць носить, переважно, довідковий характер

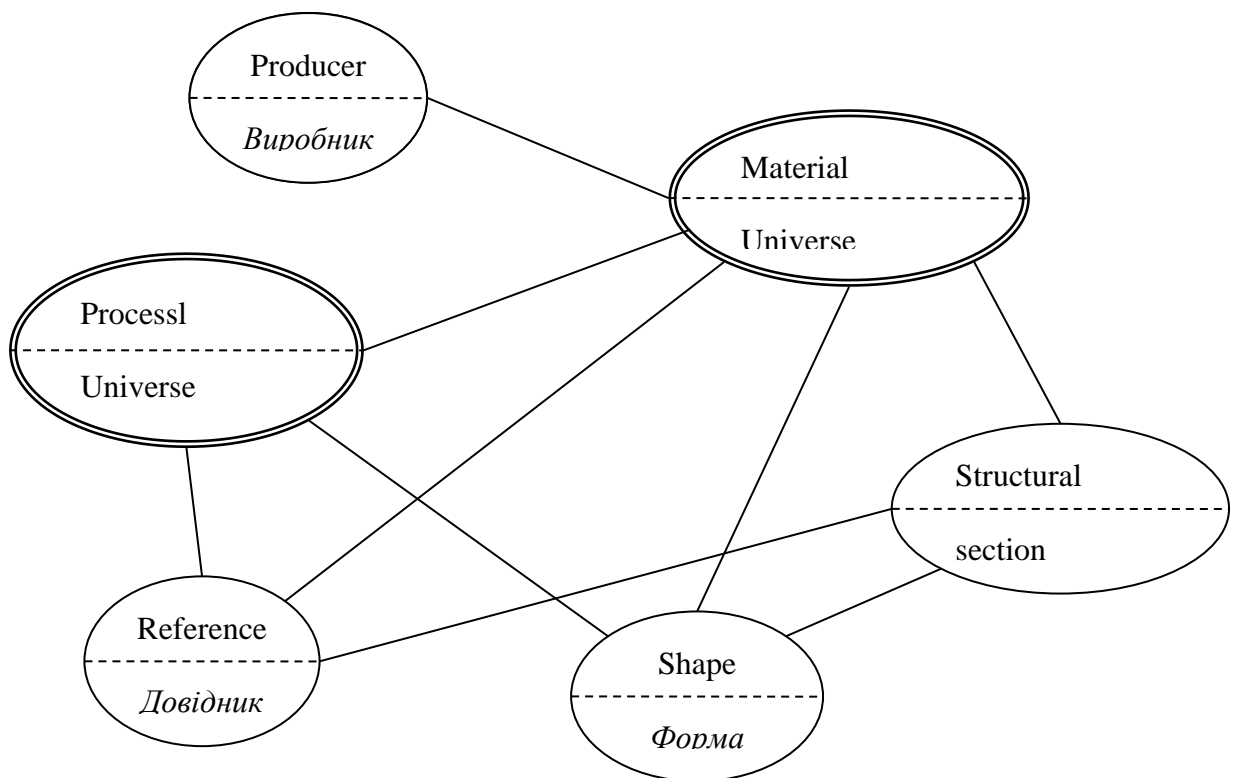


Рисунок 1.1 Схема таблиць та зв'язків бази CES Edupack

Структуру таблиці матеріалів<sup>2</sup> показано на рис. 1.2. Кожен з класів матеріалів, показаних на схемі може містити один або декілька рівнів підкласів. Так, наприклад, клас Метали та сплави -> Чорні (Metals and alloys -> Ferrous) містить 8 підкласів першого рівня і більше 50 підкласів наступних рівнів. Загальна кількість матеріалів класу чорних металів та сплавів складає 656.

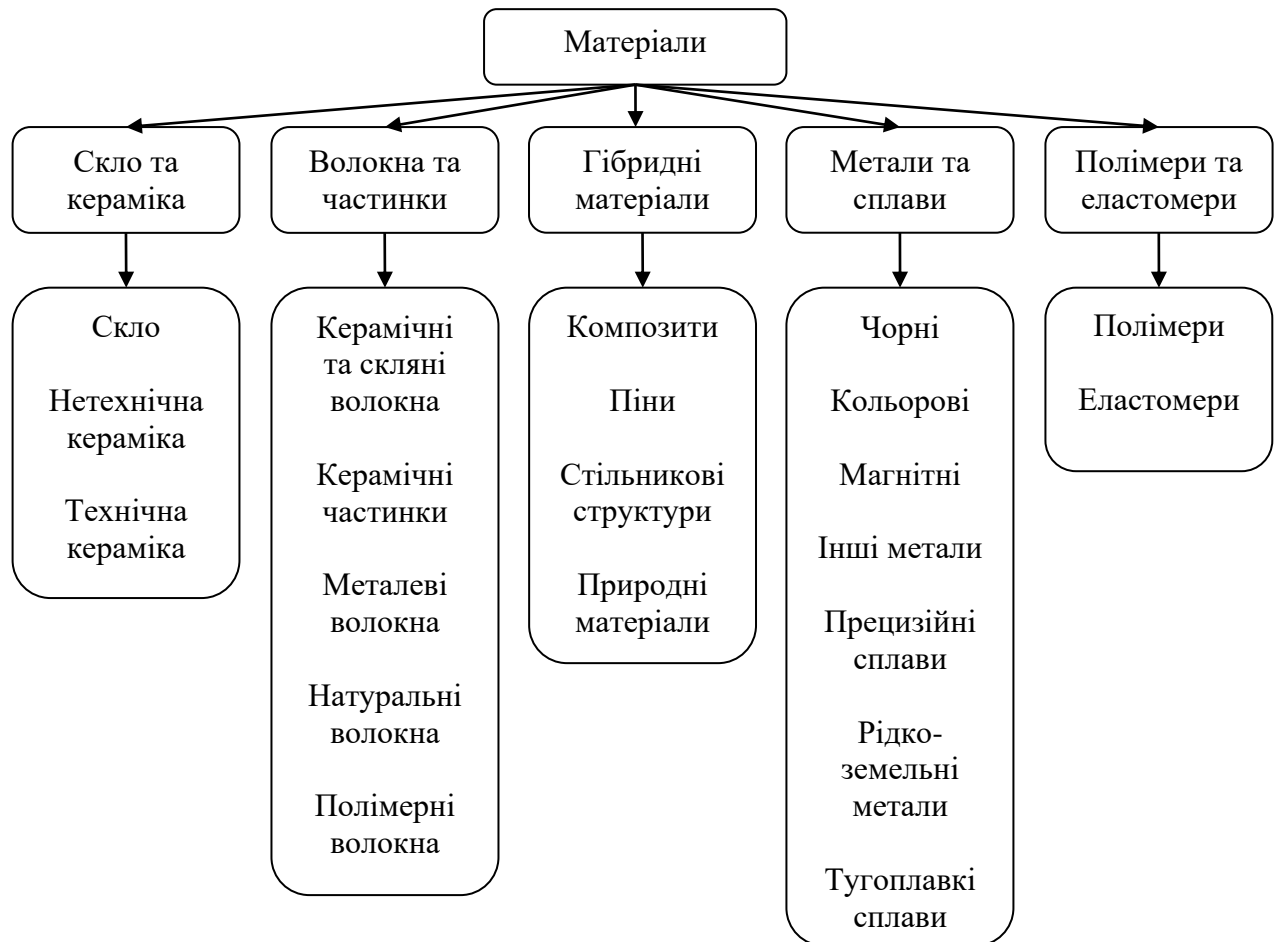


Рисунок 1.2 Схема бази даних матеріалів.

Кожен запис таблиці матеріалів містить структуровану та неструктуровану інформацію. Структурована інформація - це набір характеристик матеріалів виражених в кількісному чи якісному вигляді. Добре означені характеристики (наприклад густина, модуль пружності, температура плавлення, ціна, тощо) виражають кількісними характеристиками: одним значенням чи інтервалом можливих значень. Характеристики, точні значення яких розміщувати недоцільно (стійкість в різноманітних середовищах, можливість застосування технологічних процесів, тощо) виражають якісними характеристиками, що відображають декілька рівнів, залежно від обраної

<sup>2</sup> Система CES Edupack містить три рівні основної бази даних, з різною кількістю матеріалів. Якщо інше не вказано явно, мова йде про базу рівня 3 (Level 3).



характеристики. Неструктуровані дані містять додаткову інформацію про матеріал: відомі галузі застосування, традиційні технологічні схеми, проблеми, що виникали при виробництві та застосуванні матеріалів, тощо.

Властивості матеріалу, обраного зі списку, подаються у вигляді інформаційної картки, приклад якої показано на рис. 1.3 та 1.4.

The screenshot shows the CES software interface. On the left, a tree view under 'Material Universe' lists various materials, with 'Sialons (Si-Al-O-N ceramic)' selected. The main panel on the right displays the properties of this material.

**Sialons (Si-Al-O-N ceramic)**

Layout: All attributes

Ceramics and glasses > Technical ceramics >

**General information**

**Designation** ⓘ  
Sialon

**Typical uses** ⓘ  
Cutting tools, wear resistant parts; Welding jigs; High temperature gas valve parts; Injector nozzles.

**Composition overview**

**Compositional summary** ⓘ  
Si<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>N<sub>5</sub>

Material family	ⓘ	Ceramic (technical)
Base material	ⓘ	Other

**Microstructure** ⓘ  
Grain size: 3-1µm

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

Al (aluminum)	ⓘ	2,83	-	5,83	%
N (nitrogen)	ⓘ	34,3	-	40,3	%
O (oxygen)	ⓘ	2,07	-	4,57	%
Si (silicon)	ⓘ	50	-	60	%
Other	ⓘ	0	-	0,1	%

**Price**

Price	ⓘ	* 24,7	-	36,1	EUR/kg
-------	---	--------	---	------	--------

Рисунок 1.3 Загальний вигляд вікна програми CES з структурованими властивостями обраного матеріалу Сіалони (Sialon Si-Al-O-N ceramic).

	Cordierite
	Diamond
	Forsterite
	Germanium
	Halite (NaCl)
	Lithium fluoride
	Magnesia
	Magnetic
	Molybdenum disilicide
	Mullite
	Niobium carbide
	Potassium aluminosilicate mu
	Sialons (Si-Al-O-N ceramic)
	Silicon
	Silicon carbide
	Silicon nitride
	Steatite
	Tantalum carbide
	Thoria
	Titanium carbide
	Titanium diboride
	Titanium dioxide
	Tungsten carbide
	Zirconia
	Zirconium carbide

<b>Optical properties</b>			
Color		Black	
Transparency		Opaque	
<b>Durability</b>			
Water (fresh)		Excellent	
Water (salt)		Excellent	
Weak acids		Excellent	
Strong acids		Acceptable	
Weak alkalis		Excellent	
Strong alkalis		Limited use	
Organic solvents		Excellent	
Oxidation at 500C		Excellent	
UV radiation (sunlight)		Excellent	
Halogens		Acceptable	
Metals		Acceptable	
Flammability		Non-flammable	
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>			
Embodied energy, primary production		* 104	- 115 MJ/kg

Рисунок 1.4 Неструктуровані властивості того ж матеріалу.

Інформаційна картка матеріалу відображає тільки ті його властивості, які мають відповідні значення в базі даних. Якщо для матеріалу відсутня інформація у полі, наприклад, "Electrical resistivity" (питомий електроопір), то відповідна характеристика не буде відображена в інформаційній картці. Поряд з основними властивостями матеріалу, інформаційна картка містить екологічні характеристики представлені трьома розділами: "Primary production energy, CO2 and water" ("Екологічні характеристики виробництва матеріалу - витрати енергії, води, викиди CO<sub>2</sub>"), "Processing energy & CO2 footprint" (Екологічні характеристики оброблення матеріалу) та "Recycling and end of life" (Характеристики утилізації, переробки чи повторного використання). Повний список властивостей матеріалів наведено в додатку 1. Доповнюється інформаційна картка зв'язками для переходу до інших таблиць бази даних, пов'язаних з обраним матеріалом.

З таблицею матеріалів логічно поєднана таблиця процесів (виробництва та оброблення матеріалів та виробів), яка має структуру, показану на рис. 1.5. Окремо виділяються формоутворюючі процеси (об'єднують групу первинного формоутворення та вторинних процесів), процеси поверхневого оброблення та процеси з'єднання. Кожен елемент схеми є групою процесів, і включає певну кількість записів. Наприклад група "композиційне формування" (composite forming) включає 16 окремих процесів, розділених на 6 груп.

Запис кінцевого процесу представлено інформаційною карткою, приклад якої показано на рис. 1.6. Інформаційна картка містить короткий опис процесу та його схематичне зображення; характеристики процесу стосовно доступних

типів форми та габаритів. Додатково наведено економічні характеристики процесу та їх залежність, наприклад, від розмірів серії. Докладніше оптимальний вибір матеріалу за критерієм вартості виробництва розглянуто в практикумі 4.

Таблиця форм (Shape) пов'язана з обома основними таблицями, і містить 3 класи форм, розділених на підкласи, що дозволяє визначитись стосовно сумісності обраних матеріалу та процесу з заданою формою виробу.

Таблиця профілів (Structural Section) містить інформацію про довгомірні профілі, які випускаються промисловістю. В таблиці наведено стандартизовані розміри для кутиків - angle (рівнобоких та нерівнобоких), швелерів - channel, двотаврів - I-section, таврів - T-section, прямокутних труб - rectangular hollow та труб - tube. Представлено основні види матеріалу: сталь, алюміній та склопластик (glass vinyl ester). Для кожного типорозміру профілю подано загальні характеристики матеріалу та властивості профілю.

Таблиця виробників (producers) містить довідкову інформацію про виробників матеріалів, напівфабрикатів, структурованих виробів (піни, комірчасті структури) тощо. Таблиця має довідниковий характер і доступна безпосередньо з інформаційних карток матеріалів.

Таблиця довідник (reference) містить велику кількість різномірної інформації, що, серед іншого включає перелік та посилання на бази даних виробників, окремі журнали, матеріали конференцій, стандарти, тощо.

Дві останні таблиці producers та reference є довідковими, і безпосередньо у виборі матеріалу не задіюються.

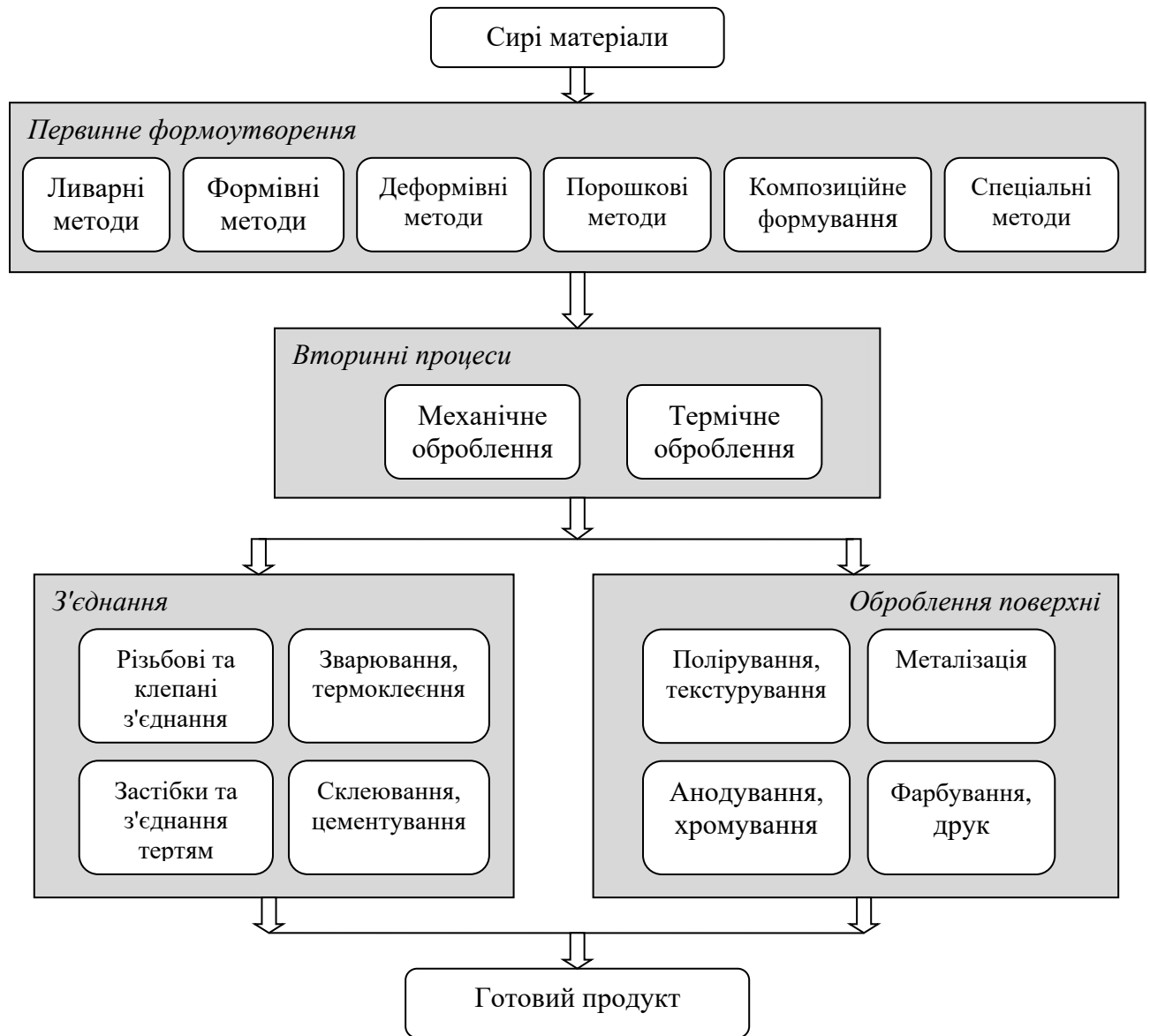


Рисунок 1.5 Схема бази процесів

ProcessUniverse

- Joining
- Shaping
  - Additive manufacturing
  - Casting
  - Composite forming
    - Automatic layup
    - Compression molding
    - Continuous
    - Manual layup
    - Autoclave molding
    - Hand lay-up
    - Vacuum/Pressure Bagging**
  - Resin transfer
  - Spraying
- Deformation
- Deposition
- Machining
- Molding
- Powder methods
- Surface treatment

Shaping > Composite forming > Manual layup >

**General**

**Designation** ⓘ

Composite forming: Vacuum/Pressure Bagging

**The process**

In VACUUM/PRESSURE BAGGING, the reinforcement and the resin are applied on the mold by conventional hand or spray lay-up techniques. The laminate is then subjected to compacting forces from (a) vacuum bags or (b) pressure bags in order to speed up curing. These bags comprise flexible sheets which are placed over the laminates and are sealed and evacuated (or sealed and pressurized) thus applying uniform forces over the surface of the molding. The use of vacuum or pressure bags ensures high quality dense products. A single mold is used which can be made of GRP, epoxy or metal. The additional equipment needed include: automatic tape-laying machine and vacuum pump or compressor.

**Process schematic**

The schematic illustrates the manual layup process and the subsequent bagging techniques. The initial steps show a 'Roll' of reinforcement being applied to a 'Mold' with a 'Release coat', followed by 'Brush on resin'. The final step shows the 'Lay-up reinforcement' on the mold. Two paths lead from this step: (a) VACUUM BAGGING, which involves a 'Flexible bag' and a 'Heater' connected to a 'Pump' to evacuate the air, and (b) PRESSURE BAGGING, which involves a 'Flexible bag' and a 'Heater' connected to a 'Pressure' source to pressurize the bag.

Рисунок 1.6 Інформаційна картка процесу "ручне композиційне формування" (Composite forming → Manual layup)

Крім розглянутих таблиць база даних містить інформацію стосовно стандартних методів визначення характеристик матеріалів, так звані "notes", зв'язану з назвою відповідної характеристики в інформаційній картці матеріалу. Така інформація характеризує весь блок пов'язаних властивостей (механічні, електричні), супроводжується схемами, графіками, розрахунками та містить посилання на зовнішні джерела інформації.

## 1.2 Засоби вибору матеріалів

Порядок вибору матеріалу за допомогою пакету CES Edupack можна подати у вигляді схеми (рис. 1.7). Кожен з чотирьох представлених в схемі кроків може бути адаптований до умов певної задачі, може виконуватись різними способами, постійною залишається їх послідовність. Докладний розгляд кроків вибору наведено в наступних розділах,

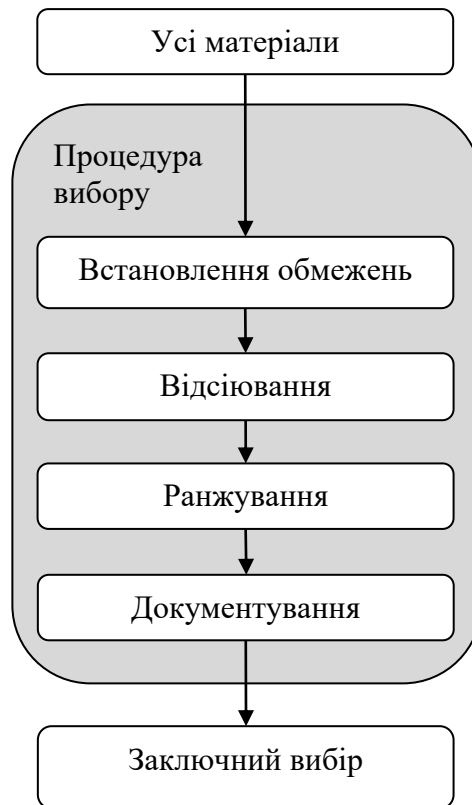


Рисунок 1.7 Порядок вибору матеріалу

Програмна оболонка бази даних містить достатній набір інструментів для автоматизованої реалізації кожного з кроків процедури, а також інших маніпуляцій з базою даних.

Основне меню програмної оболонки містить селектор робіт, вигляд якого показано на рисунку 1.8 а). Основні види робіт: Browse (перегляд), Search (пошук), Chart/Select (графіки/вибір). Уточнюючі ключі режиму роботи включають вибір бази даних (Database), окремої таблиці в базі даних (Table) та підмножини записів в таблиці (Subset) (рисунок 1.8б ).

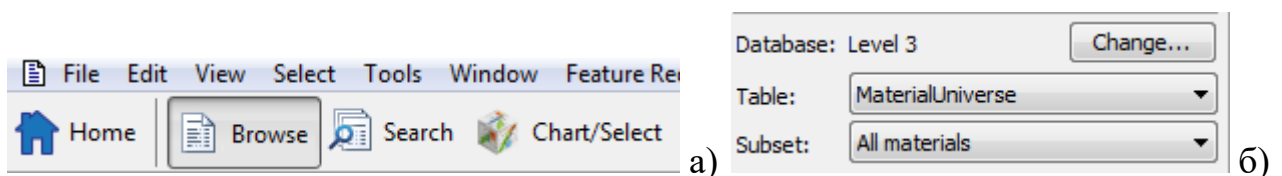


Рисунок 1.8 Селектор робіт програмної оболонки

Режим роботи **Browse** призначений для вільного перегляду змісту таблиць бази даних. Можливий вибір уточнюючих ключів залежить від обраного значення на верхньому рівні. Так, наприклад, якщо значення ключа

Database обране Level 1, то доступні лише дві таблиці: MaterialUniverse та ProcessUniverse. Для Database: Level 2 - додатково доступні таблиці Producers та Reference. Доступні значення ключа Subset залежать як від Database так і від обраної таблиці Table. Перегляд стає доступним за допомогою дерева папок та індивідуальних записів у правій частині робочого вікна. Навігація деревом перегляду подібна до навігації файлових браузерів Windows, інтуїтивно зрозуміла та не потребує розширеного опису. В режимі перегляду можливо відкрити інформаційну картку як для матеріалу, так і для окремих груп матеріалів.

Режим роботи **Search** призначений для пошуку за ключовими словами у поточній обраній базі даних. Так пошук слова "titanium" в базі даних Level 1 повертає 4 записи таблиці MaterialUniverse та 5 записів таблиці ProcessUniverse. В базі даних Level 2 - 8 записів в таблиці MaterialUniverse, 11 записів в таблиці ProcessUniverse, 21 запис в таблиці Producers та 4 записи в таблиці Reference. Пошук за ключовим словом проводиться в усіх таблицях бази даних. Для побудови складних запитів пошуку застосовуються стандартні прийоми - використання сполучників AND, OR, заперечення NOT, лапок (" ") для пошуку фрази та дужок для позначення порядку виконання дій пошуку.

Основним режимом роботи програмної оболонки є Chart/Select. Саме у цьому режимі виконуються основні кроки алгоритму вибору (рисунок 1.7) - встановлення обмежень, відсіювання та ранжування.

При переході до режиму **Chart/Select** у лівій частині робочого вікна відображається фрейм управління та стану процедури вибору - Selection Project, вигляд якого показано на рисунку 1.9.

Інструмент вибору бази дає можливість змінити поточну базу даних на іншу доступну в системі. Для кожної з обраних баз даних існує список доступних виборів підмножини пошуку - наперед встановлені таблиці матеріалів та процесів, а також їх підрозділи. В усіх випадках можливим є вибір: Define your own subset..., який передбачає можливість безпосередньо вказати групи матеріалів або процесів, які будуть задіяні в подальшому аналізі. Діалогове вікно оперує деревоподібним відображенням основних таблиць бази даних: MaterialUniverse та ProcessUniverse. Фільтр Select from: дозволяє суттєво скоротити час аналізу, зосередившись на необхідному класі матеріалів, наприклад: Ceramics - кераміка або Tool steels - інструментальні сталі.

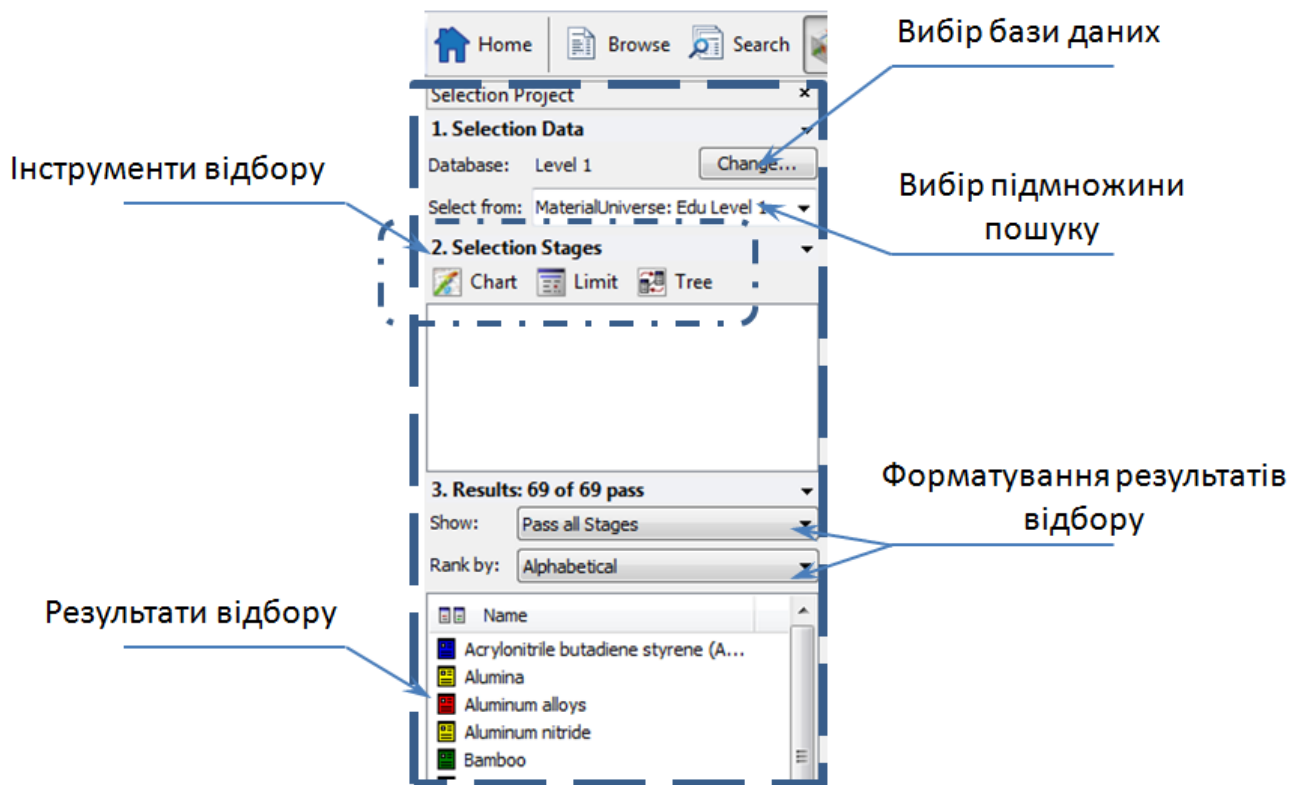


Рисунок 1.9 Вигляд фрейму Selection Project.

Інструменти відбору, зосереджені в пункті Selection Stages призначені безпосередньо для виконання основних кроків відбору - встановлення обмежень, відсіювання та ранжування. Кожен з трьох інструментів дозволяє встановити обмеження, при чому їх можна використовувати в довільному порядку. Розглянемо інструменти та методику їх застосування.

Інструмент **Limit** безпосередньо призначений для вибору обмежень за властивостями матеріалів або за характеристиками процесів. В результаті активації цього інструменту в правій частині робочого вікна відкривається форма зі списком властивостей, фрагмент якої для таблиці матеріалів (Material Universe) показано на рисунку 1.10.

Форма вибору властивостей матеріалів або процесів є універсальним засобом вибору та одержання інформації. Форма містить перелік груп властивостей, контекстно залежний від обраної бази даних. Кожна група може бути розкрита, як група Mechanical properties на рисунку, відображаючи список властивостей.

Для кожної відображеної властивості можуть бути вказані максимальні та/або мінімальні значення в одиницях вимірювання, які наведено у формі справа. Якщо для властивості граничні значення проектом не передбачені, числові поля залишаються порожніми. Значок графічної підказки зліва від поля



вводу дозволяє одержати додаткову інформацію про рівень обраної характеристики для різних груп матеріалів. У випадку роботи з таблицею процесів, переважна більшість властивостей пов'язана з сумісністю процесів з матеріалами, з функціональністю, тощо. Числові значення в таблиці процесів переважно пов'язані з моделюванням продуктивності та собівартості технологічного процесу.

Click on the headings to show/hide selection criteria

- ▶ General properties
- ▼ Mechanical properties
 

	Minimum	Maximum	
Young's modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Yield strength (elastic limit)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Tensile strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Elongation	<input type="text"/>	<input type="text"/>	% strain
Hardness - Vickers	<input type="text"/>	<input type="text"/>	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Fracture toughness	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa.m <sup>0.5</sup>
- ▶ Thermal properties
- ▶ Electrical properties
- ▶ Optical properties
- ▶ Eco properties

Рисунок 1.10 Форма вибору властивостей матеріалів.

Безпосередній вибір назви властивості курсором миші активує зв'язок з інтерактивним довідником (notes), де надано докладний опис властивості, зв'язок з іншими властивостями, правила та техніку визначення числових значень для даної властивості, тощо. Застосування значень обраних властивостей, які внесено в поля форми, реалізується натисканням кнопки Apply вгорі форми.

При роботі з інструментом Limit необхідно враховувати декілька принципових зауважень:

- система може застосувати фільтр на числові (або якісні) значення відповідної властивості тільки тоді, коли для даного матеріалу значення відповідної властивості вказане в базі даних. Це особливо важливо для матеріалів, які доповнені до бази даних користувачем.
- одночасне застосування значної кількості обмежень може призвести до ситуації повного виродження області пошуку, і результатом операції відсіювання буде порожня множина матеріалів. Тому обмеження варто

застосовувати по одному, починаючи від найбільш принципівих, поступово скорочуючи область пошуку;

- помилка в числових значеннях вказаних в полях форми суттєво впливає на кількість матеріалів, що пройдуть відсіювання та на їх відповідність справжнім обмеженням;

- якщо необхідно застосувати декілька обмежень, починати необхідно з найбільш строгого, важливого, унікального. Так при виборі матеріалу, від якого вимагається прозорість, необхідно почати саме з оптичних характеристик, що суттєво звужить поле пошуку.

- важливо розуміти, що обрана властивість вважається такою, що відповідає заданим вимогам, якщо інтервал значень властивості в базі даних хоча б перетинається з інтервалом, заданим користувачем. Так, наприклад, якщо використовувати базу даних Level 1, і задати в інструменті Limits значення модуля пружності (Young's modulus) min= 160 ГПа, max=195 ГПа, то серед матеріалів, що відповідають вимогам буде значитись нержавіюча сталь (Stainless steel) зі значенням модуля пружності в базі даних (189 - 210 ГПа).

Інструмент **Tree** дозволяє звужити множину пошуку явно вказавши групи матеріалів та / або технологічних прийомів, що відповідають бажаному вибору. Активація цього інструменту супроводжується відображенням діалогового вікна Tree Stage з можливим переходом до розгалуженого вигляду таблиць поточної бази даних. Перелік варіантів вибору контекстно залежить від обраної бази даних (Level 1, Level 2 або Level 3) і фактично відповідає реалізації режиму Browse, описаного вище. Кожен вибір елемента бази даних підтверджується кнопкою Insert діалогового вікна Tree Stage

Інструмент Tree дозволяє комбінувати відбір матеріалу за групою чи властивостями з відбором технологічних процесів за набором відповідних параметрів. За допомогою цього інструменту можна забезпечити також залучення до відбору інших таблиць бази даних.

Обираючи базу даних матеріалів можна безпосередньо зосередити вибір, наприклад, на металах, на кераміці, тощо, або заглибитись у базу на довільну глибину і обрати більш вузьку групу, наприклад: Metall and alloys → Refractory alloys → Niobium. База даних процесів дозволяє обрати характерну групу процесів, наприклад Shaping → Powder methods.

Загальний вигляд діалогового вікна, показано на рисунку 1.11. Інструментом Tree обрано Ніобієві сплави, вироби з яких можна одержувати методами порошкової металургії.

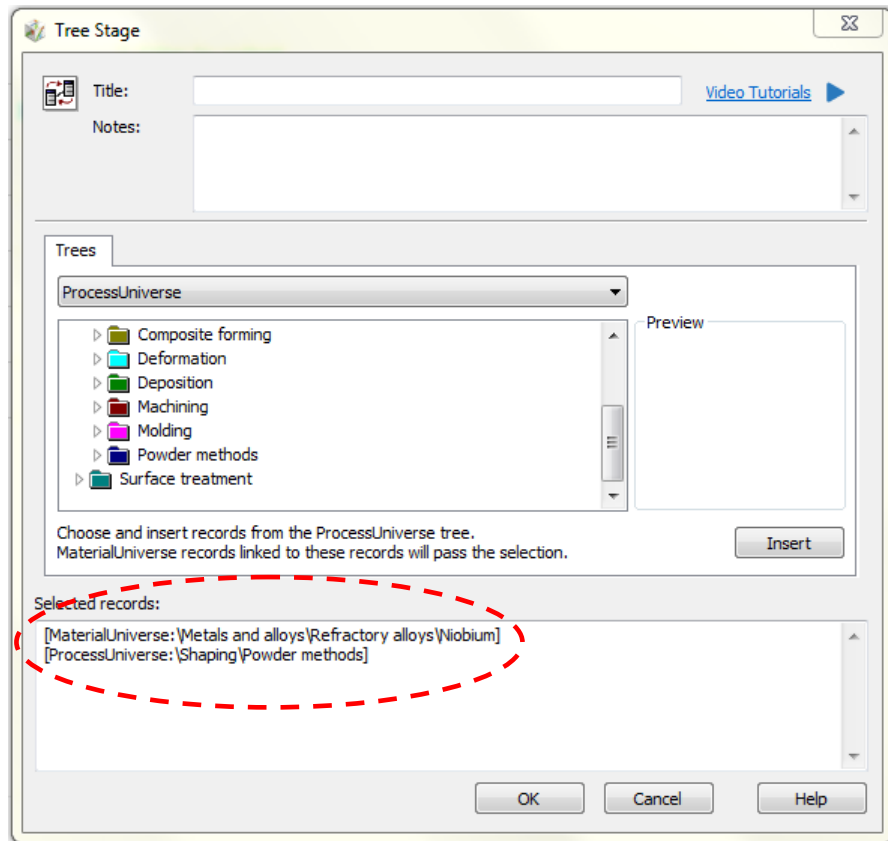


Рисунок 1.11 Форма вибору властивостей матеріалів.

Інструмент Graph є найбільш універсальним - дозволяє виконувати послідовно чи одразу цілу низку операцій:

- візуалізувати інформацію, чим суттєво спрощується сприйняття відносних значень характеристик матеріалів та забезпечується одночасний аналіз значної кількості інформації;
- скорочувати поле пошуку в графічному режимі, шляхом застосування декількох різних прийомів - відбір лінією (Gradient Line Selection), відбір прямокутником (Box Selection);
- обирати матеріал, оптимальний за наперед заданим критерієм та групу матеріалів, що незначно поступаються оптимальному.

Управління процесом побудови графіків здійснюється через діалогове вікно Chart Stage (рисунок 1.12).

Програмна оболонка передбачає використання трьох варіантів графіків: однокоординатних (Bar), двокоординатних (Bubble) та кількісних (Count).

Однокоординатні графіки використовують для графічної візуалізації співвідношення матеріалів або процесів за заданим критерієм (властивістю чи комбінацією властивостей).

При побудові однокоординатного графіку на одній з осей (X-Axis або Y-Axis) відкладаються числові значення обраної властивості або деякого інтегрального показника, що об'єднує ряд властивостей, а інша вісь залишається номінальною - за нею відкладаються назви матеріалів або груп. Результат має вигляд набору штрихів, що відповідають мінімальному та максимальному значенням відповідних властивостей, як показано на рисунку 1.13.

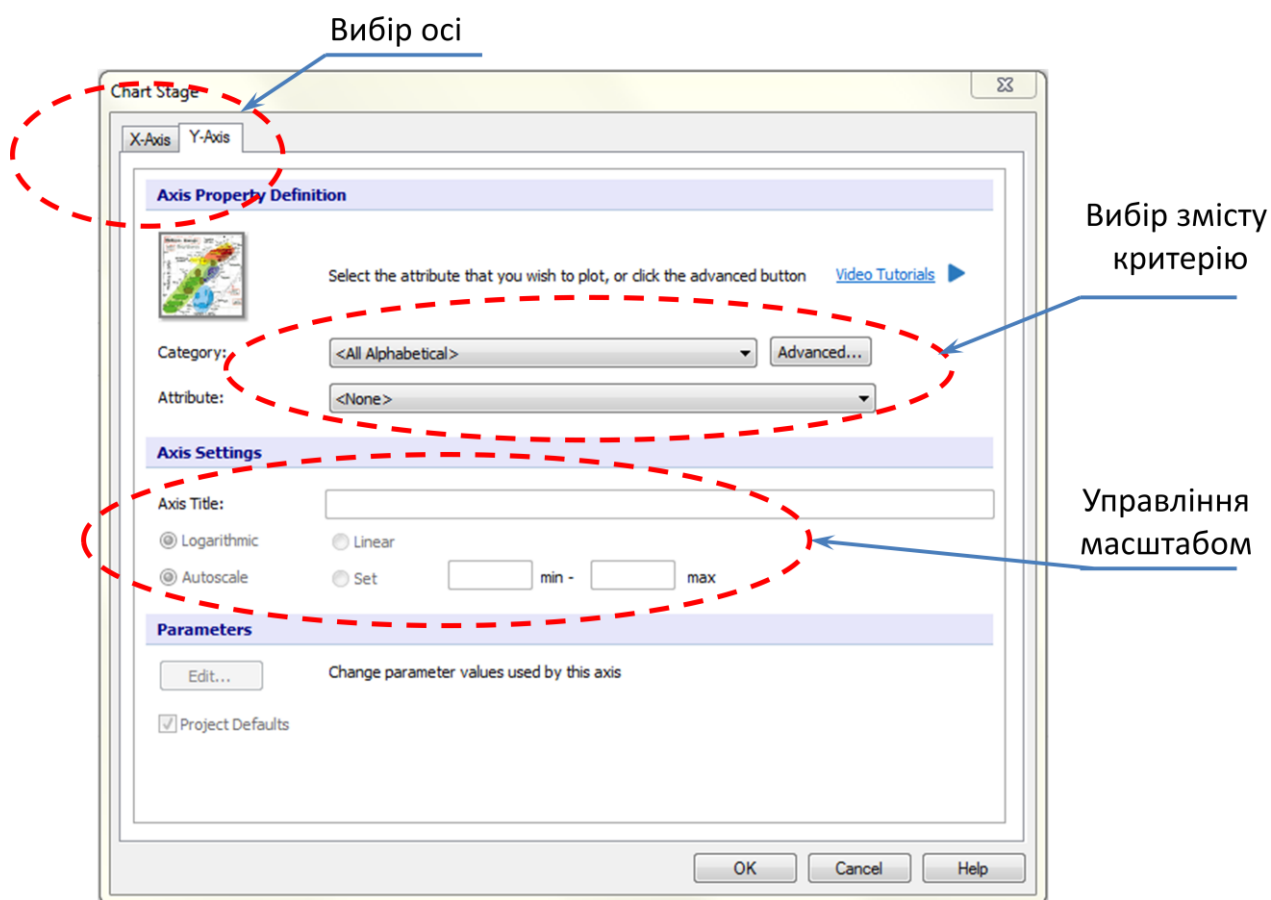


Рисунок 1.12 Діалогове вікно побудови графіків.

При побудові двокоординатного графіку чисельні характеристики відкладаються за обома осями. Результат має вигляд набору точок або невеликих областей еліптичної форми, як показано на рис. 1.14. Саме двокоординатні (Bubble) графіки є візитною карткою програмного комплексу CES.

У випадку, коли за однією чи обома осями відкладається характеристика, яка в базі даних має не кількісні, а якісні значення, результат має вигляд

кількісного графіка, приклад якого показано на рисунку 1.15. Фактично кількісний графік - це таблиця, в клітинках якої вказано кількість матеріалів, що відповідає комбінації заданих якісних значень властивостей.

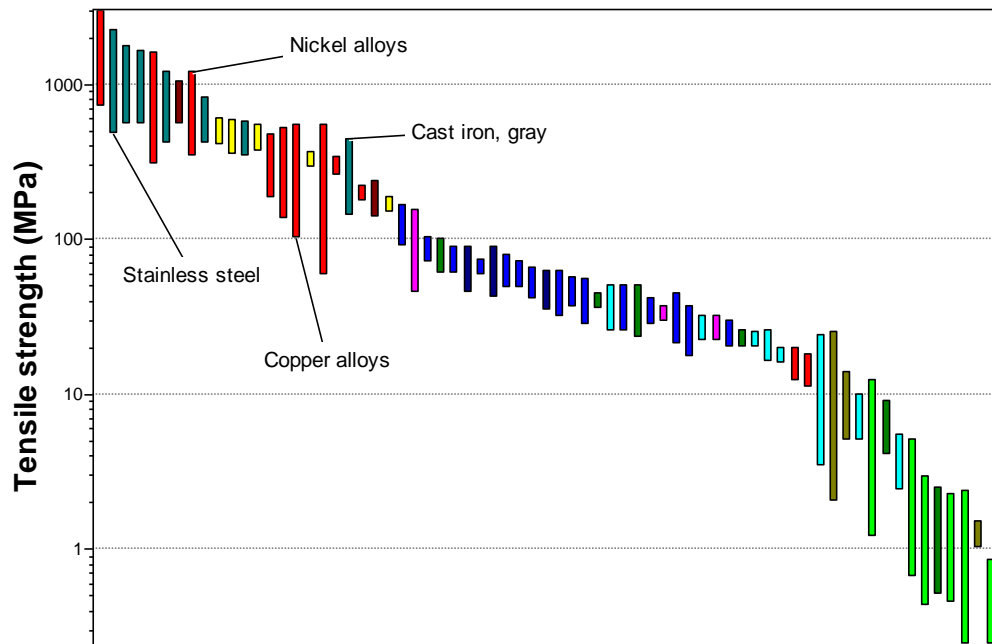


Рисунок 1.13 Однокоординатний графік межі міцності матеріалів (Tensile strength).

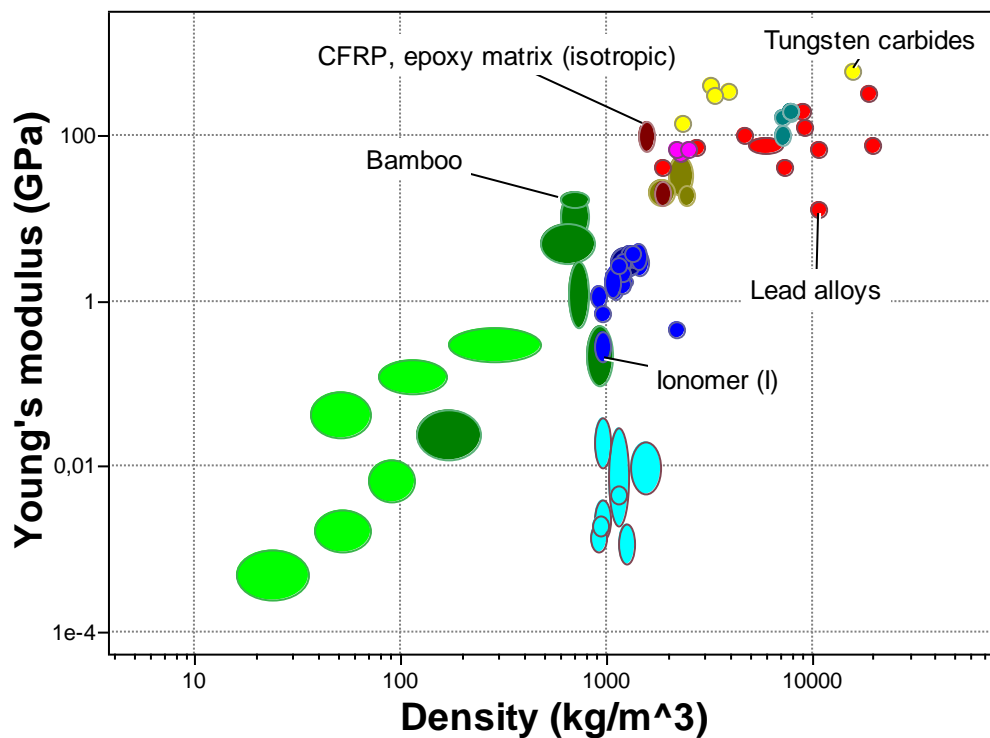


Рисунок 1.14 Двокоординатний графік зв'язку модуля пружності та густини матеріалів.

Electrical conductor or insulator?	Good insulator	2	0	5	31
	Poor insulator	1	0	3	6
	Semiconductor	1	0	0	0
	Poor conductor	1	0	1	0
	Good conductor	16	2	0	0
		Good conductor	Poor conductor	Poor insulator	Good insulator
Thermal conductor or insulator?					

Рисунок 1.15 Двокоординатний кількісний графік в координатах теплопровідність - електропровідність.

При побудові одно- або двокоординатних графіків кількісні осі можуть бути форматовані шляхом, що відповідає змісту інформації. Форматування здійснюється інструментами, що розташовані на формі діалогового вікна побудови графіків в області позначеній як "Управління масштабом" (рис. 1.12). Можливо встановити наступні параметри:

- Axis Title - назва осі. У виділеному полі може бути вказана назва осі відмінна від автоматично згенерованої. Доцільно застосовувати у випадку використання мови, відмінної від англійської.

- Тип осі - може бути обраний логарифмічний (Logarithmic) або лінійний (Linear). За замовчуванням система CES застосовує логарифмічні осі, оскільки на повній множині матеріалів більшість характеристик має розкид характеристик у декілька порядків. Однак, для окремих характеристик, застосування логарифмічних осей неможливе, як наприклад для температурних характеристик.

- Масштаб - може бути обраний автоматичний (Autoscale) або встановлений безпосередньо (Set) - тоді вказують мінімальне та максимальне значення осі.

Зміст критерію для графіків обирається селекторами, позначеними як "Вибір змісту критерію" на рис.1.12. Послідовно обирається категорія та безпосередньо параметр.

Якщо необхідно використати складний параметр застосовують засіб-калькулятор, що активується кнопкою Advanced... В діалоговому вікні,

показаному на рис. 1.16 створюються вирази, що комбінують декілька існуючих характеристик. Вирази створюються шляхом комбінування назв параметрів, обраних зі списку та знаків математичних операцій, винесених на окремі кнопки.

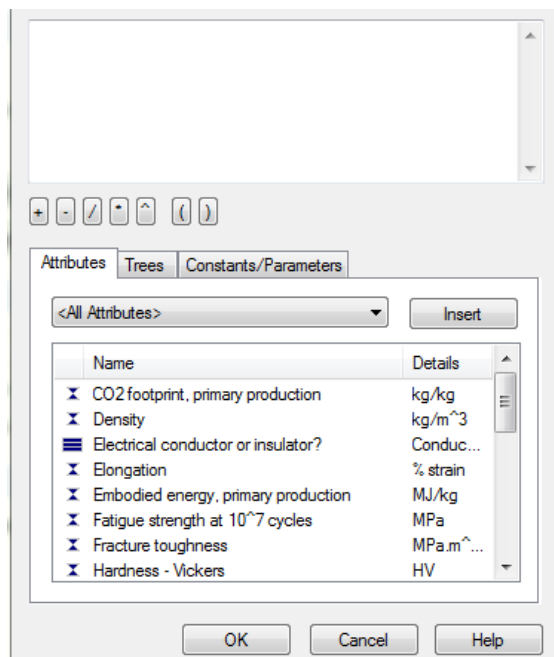


Рисунок 1.16 Засіб створення складних параметрів.



Рисунок 1.17 Інструменти роботи з графіками

На рис.1.17 показано основні інструменти оперування графіками та відбором в режимі Chart. Призначення програмних кнопок наступне:

Кнопка 1. Properties - властивості. Інструмент повторно викликає діалогове вікно побудови графіків і надає можливість редагувати основні характеристики уже створеного графіка та кожної з осей. При повторному виклику діалогового вікна воно може містити додаткову закладку, що передбачає зв'язування графіків з різними стадіями відбору матеріалів.

Кнопка 2. Кнопка вибору - активує режим вибору точки чи області матеріалу курсором миші, одержання інформації про матеріал чи процес та розміщення підпису в полі графіка.

Кнопка 3. Gradient-Line Selection - вибір (відділення) матеріалів лінією з заданим нахилом. Наприклад застосування лінії з нахилом рівним 1 до графіка (рис. 1.14) дозволяє виділити матеріали з максимальним значенням питомого модуля пружності (відношення модуля пружності до густини матеріалу).

Створену лінію можна переміщати по області графіку залишаючи її паралельною самій собі. Цей інструмент є одним з основних при роботі з двокоординатними графіками.

Кнопка 4. Box Selection - вибір прямокутником. Інструмент дозволяє звузити інтервал властивостей, які задано чисельно, і, тим самим зменшити кількість матеріалів, що розглядаються. Фактично - це один з способів встановлення обмежень на параметри. Керування прямокутником вибору здійснюється за допомогою миші або через діалогове вікно, що відкривається при натисканні правою кнопкою миші на межі прямокутника.

Кнопка 5. Delete Selection (Delete lines and boxes) - видалити виконаний раніше вибір градієнтними лініями та прямокутниками. Застосовується для відміни усіх попередньо застосованих фільтрів та обмежень в графічній області.

Кнопки 6-8 призначені для зміни масштабу зображення, збільшення чи зменшення.

Кнопка 6. Zoom in - збільшення. Інструмент призначений для збільшення частини графіка, виділеної масштабною рамкою. Збільшене зображення заповнює весь простір графіка.

Кнопка 7. Zoom out - зменшення. Графічне зображення зменшується на один рівень, залишаючи центр зображення на своєму місці.

Кнопка 8. Autoscale - автомасштабування. Інструмент повертає масштаб та положення зображення таким чином, щоб усі активні записи (матеріали, процеси) були видимими.

Кнопка 9. Text - текст. Інструмент внесення текстових позначень, фраз в графічну область.

Кнопка 10. Curve - крива. Інструмент призначений для нанесення кривої лінії при складних видах вибору. Крива лінія наноситься як набір вузлів, які в подальшому можуть редагуватися. Нанесення кривої завершується подвійним кліком миші. Редагування вузлів та кривої в цілому здійснюється через контекстні меню, що активуються правою кнопкою миші на кривій чи на вузлі.

Кнопка 11. Show Family Envelopes - застосування візуальних контейнерів, що об'єднують представників одного й того ж сімейства матеріалів: полімери, метали та сплави, технічна кераміка, тощо.



Кнопка 12. Result Intersection - Застосовує до поточного графіка інструменти вибору та обмеження використані на усіх вкладках поточного проекту.

Кнопка 13. Hide Failed Records - Приховуються зображення усіх матеріалів, які не відповідають заданому комплексу вимог.

Панель кнопок графічного режиму доповнюється трьома інструментами, що дозволяють виділити властивості матеріалів специфічного походження або становища. Виділяються матеріали, що відносяться до попередньо обраних (Favorite), одержані з використанням синтезатора композитів (Syntesized) або матеріали, внесені до бази даних користувачем. Присутній також інструмент "Find record near selected record", що дозволяє знайти в базі даних записи з властивостями достатньо близькими до обраних матеріалів.

Коректно обрані параметри та побудований графік суттєво спрощують оцінку відносної якості матеріалів та вибір оптимального.

## **Контрольні запитання**

1. Які основні таблиці входять до бази даних системи CES Edupack?
2. Для чого призначений режим роботи оболонки Browse?
3. Яке призначення інструмента Tree режиму роботи Chart/Select?

## **Практичні завдання**

### **I Перегляд баз даних**

I.1 Використовуючи комплект баз даних Level 1 в режимі перегляду (Browse) баз даних знайти та записати англійську нотацію та переклад десяти підкласів матеріалів. Визначити: які з підкласів містять підкласи другого рівня.

I.2 Знайти в режимі перегляду (Level1) запис для матеріалу Титанові сплави - Titanium alloys. Оцінити мінливість (відношення різниці верхньої та нижньої межі характеристики до середнього значення  $\frac{2(x_{max}-x_{min})}{(x_{max}+x_{min})}$ ) наступних характеристик:

- Модуль Юнга (Young's modulus);
- Густина (Density)
- Максимальна температуру використання (Maximum service temperature) (за шкалою Кельвіна);

Занотувати основні галузі застосування титанових сплавів (не менше 5).

I.3 Знайти в режимі перегляду (Level1) запис для матеріалу Оксид алюмінію (Alumina). Оцінити мінливість наступних характеристик:

- Твердість за Вікерсом (Hardness - Vickers);
- Теплопровідність (Thermal conductivity);

Занотувати основні галузі застосування заданого матеріалу (не менше 3).

I.4 Знайти в режимі перегляду (Level2) записи для матеріалів, опрацьованих в п. I.2 та I.3. Порівняти відповідні властивості з даними. Оцінити придатність матеріалів для лиття, механічного оброблення та зварювання.

I.5 Знайти в режимі перегляду (Level2) запис для технологічного процесу Пресування та спікання порошків. Оцінити наступні характеристики технологічного процесу:

- Придатність для виготовлення 3-вимірних деталей з порожнинами;
- Точність виготовлення деталей;
- Приблизну вартість виготовлення деталі при розмірі партії 100 шт, 5000 шт. 100000 шт..

I.6 Знайти в режимі перегляду (Level2) запис для технологічного процесу Лазерне спікання металів та кераміки. Оцінити наступні характеристики технологічного процесу:

- Точність виготовлення деталей;
- Приблизну вартість виготовлення деталі при розмірі партії 100 шт, 5000 шт. 100000 шт.

I.7 Знайти в режимі перегляду (Level2) запис для матеріалу Сірий чавун. Оцінити наступні характеристики:

- Відношення модуля пружності до модуля зсуву (середні характеристики);
- Мінливість відносного видовження при деформуванні;
- Придатність до виготовлення литтям, механічного оброблення, зварювання.

## **II Маніпуляція з базами даних та пошук**

II.1 Знайти в режимі пошуку (база даних Level 2) інформацію для матеріалу Латунь - Brass. Оцінити інформацію бази даних Матеріали - MaterialUniverse та бази даних Технологічні процеси - ProcessUniverse. Для відображених

технологічних процесів визначити їх належність до сімейства (формоутворення, з'єднання, поверхневе оброблення) та класу процесів.

П.2 Знайти в базах даних статтю, що пояснює термін "Fracture toughness". Визначити відповідний український термін, короткий опис властивості, спосіб визначення.

П.3 Додати до бази даних матеріалів (Level2) запис для наступного матеріалу:

- Назва: Ferroid01;
- Густина 7,2-7,3 г/см<sup>3</sup>;
- Модуль пружності 150-170 ГПа;
- Коефіцієнт Пуассона 0,2-0,25 ;
- Відносне видовження 1-1,5%
- Одержання методом лиття - не рекомендоване;
- Придатність до механічного оброблення - добра - відмінна;
- Придатність до з'єднання зварюванням - посередня.

П.4 Знайти в режимі пошуку (Level2) запис для матеріалу Polylactide. Ознайомитись з основними даними про матеріал. Застосувавши пошук в мережі Internet, коротко описати важливу інформацію про матеріал, відсутню в базі даних.

П.5 Знайти в режимі пошуку (Level2) інформацію за ключовим словом lens - лінза. Проаналізувати одержану інформацію з баз даних матеріалів та технологічних процесів.

П.6 Знайти в базах даних статтю, що пояснює термін "Dielectric strength". Визначити відповідний український термін, короткий опис властивості, спосіб визначення.


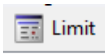

### **III. Оцінка властивостей**

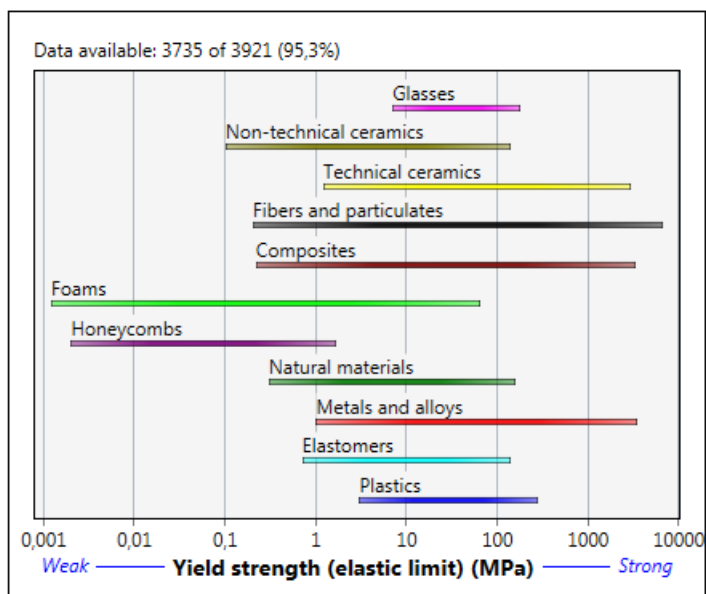
III.1 Враховуючи, що основні конструкційні матеріали подано класами: Метали та сплави, Технічна кераміка, Стекла, Композити, Полімери використати допоміжну інформацію Limit Bar, визначити для цих класів та розставити їх за спаданням значень (Доступ до діаграм Limit Bar наведено нижче, використовувати базу даних Level3)

- Модуля пружності;

- Відносного видовження при деформуванні;
- Межі міцності
- Тріщиностійкості
- Температури плавлення
- Максимальної робочої температури
- Коефіцієнта термічного розширення
- Питомого електроопору
- Енергії, що витрачається на первинне виготовлення

Доступ до Limit Bar здійснюється через послідовні вибори:

1. Кнопка Select  на основній панелі інструментів;
2. Кнопка Limit  на панелі Selection Stages;
3. Вибір групи властивостей;
4. Вибір кнопки Limit Bar  зліва від поля числових значень відповідної властивості
5. Одержання діаграми вигляду:



III.2 Для бази даних Level 2 (MaterialUniverse) побудувати однопараметричний графік за значенням параметру Модуль зсуву (Shear Modulus).

III.3 Для бази даних Level 2 (MaterialUniverse) - метали та сплави (Metals and alloys) побудувати однопараметричний графік за значенням питомого модулю пружності. Підмножину матеріалів обрати інструментом Tree. Питомий модуль пружності одержати через генератор формул як: Young's modulus/Density.

III.4 Для бази даних Level 3 (MaterialUniverse), підмножини «метали та сплави» побудувати двопараметричний графік в координатах питома межа міцності (Tensile strength) - питомий модуль пружності. Підмножину матеріалів обрати інструментом Tree, значення питомих характеристик за допомогою генератора формул.

III.5 За допомогою графіку, одержаного в п. III.4 оцінити кількість матеріалів, що має значення обох характеристик в межах від 0.02 до 0.05. Оцінити одиниці вимірювання за кожною з осей.

## **Комп'ютерний практикум 2.**

### **Технологія оптимального вибору матеріалу**

**Мета практикуму:** Практично оволодіти послідовністю кроків та основними прийомами оптимального вибору матеріалів засобами CES Edupack

#### **2.1 Стратегія вибору матеріалів**

В практикумі 1 (рис. 1.7) схематично розглянуто послідовність кроків, що забезпечують одержання оптимального вибору з множини альтернатив за наперед сформованим показником ефективності. Зупинимось на змісті кроків докладніше.

Крок встановлення обмежень (в англomовній літературі позначається як Translation) включає формулювання вимог до матеріалу, їх перекладення до необхідних (кількісних чи якісних) значень конкретних властивостей. В результаті виконання цього кроку вимоги до матеріалу (або іншого об'єкту) мають бути записані у вигляді функціональних залежностей, обмежень, цільової функції (критерію оптимізації) та вільних змінних. Для цього необхідно провести "логічний аналіз" - визначитись з рядом запитань.

По-перше: яку функцію виконує виріб чи деталь, для яких обирають матеріал?

По-друге: які властивості матеріалу необхідні для виконання визначеної функції? Такі властивості одержують статус обмежень, адже матеріал, який їм не відповідає, не дозволить виконати функцію. Для виробів, основне завдання яких витримувати механічне навантаження, обмеженнями виступають механічні характеристики (модуль пружності, межа міцності, відносне видовження, тощо). При іншій функціональності, обмеженнями можуть бути питомий електроопір, коефіцієнт теплопровідності, магнітні властивості, оптична проникність тощо.

По-третє: яка мета оптимізації вибору матеріалу? Відповіддю на це запитання є вибір цільової функції - параметру або набору параметрів, функція від яких має набути екстремального значення. Найчастіше в якості цільової функції виступає вартість матеріалу (чи виробу в цілому), маса виробу, вплив на навколишнє середовище, втрати енергії. В реальних задачах цільова функція має вигляд математичної залежності, в яку входить одразу декілька параметрів.

Важливо чітко розрізняти обмеження та критерій оптимізації. Обмеження мають вигляд розмірних числових значень, що відображають верхню або нижню межу відповідного параметра. Критерій оптимізації - функція, для якої необхідно знайти екстремальне (мінімальне або максимальне) значення на дискретній множині альтернатив. Побудова адекватної цільової функції є ключем до успішного вирішення усієї задачі.

По-четверте: які властивості матеріалу або параметри виробу залишаються вільними - їх значення не обмежує вибору. В окремих випадках такими властивостями можуть бути габаритні розміри виробу, але якщо виріб є деталлю механізму, то його габарити, навпаки, чітко означені.

Крок відсіювання (**Screening**) передбачає виведення з розгляду матеріалів, які не задовольняють вимогам обмежень, викладеним на попередньому кроці. Крок відсіювання не передбачає аналізу ситуації - немає потреби визначати яким саме вимогам не відповідає матеріал (об'єкт), наскільки він не відповідає вимогам, скільки об'єктів відповідають усім заявленим вимогам.

Якщо крок відсіювання повертає для подальшого розгляду порожню множину, об'єктів, то необхідно повертатись до попереднього кроку (встановлення обмежень) і змінювати параметри або їх значення, яким обов'язково мають відповідати матеріали.

Встановлення обмежень та відсіювання засобами пакету CES Edupack реалізується в режимі Chart/Select одним з доступних інструментів (Limit, Tree, Chart) або їх комбінацією

Результатом виконання кроку ранжування (**Ranking**) має бути ранжований (впорядкований) за значенням цільової функції ряд матеріалів, які відповідають обмеженням. З такого ряду обирають декілька варіантів з найкращим значенням цільової функції для подальшого розгляду.

Ключовим моментом для успішного проведення ранжування є точний вибір індексу матеріалу, який безпосередньо пов'язаний з критерієм оптимізації. В простих випадках індекс матеріалу повністю відповідає критерію. Прикладом таких випадків є пошук найдешевшого матеріалу чи найлегшого матеріалу, що відповідає заданим обмеженням. Проте, у більшості випадків, безпосереднє формулювання індексу матеріалу є наслідком докладного інженерного аналізу умов задачі. Питання визначення індексу матеріалу розглянуте в наступному параграфі.

В тому випадку, якщо етап "Встановлення обмежень і відсіювання" проходить достатня кількість матеріалів їх ранжування здійснюють в режимі побудови графіка. Якщо критерій оптимального вибору просто формалізується, достатньо побудувати однокоординатний графік, в який включені усі матеріали, що відповідають вимогам, а по чисельній осі відкласти значення параметра оптимізації. При більш складній ситуації будують двокоординатний графік, а критерій оптимізації формують інструментом Gradient-Line Selection

Крок документування полягає в зборі максимально можливої кількості інформації про обрані для розгляду матеріали.

Документування засобами CES здійснюється через докладне вивчення відомостей про матеріали, що пройшли ранжування за даними, приклад яких показано на рисунках 1.3, 1.4 та/або 1.6, якщо для інженерної ситуації важливі характеристики технологічних процесів. Увагу, серед іншого, приділяють тим властивостям, технологічним параметрам, екологічним особливостям, які не було включено до процесу вибору ні у вигляді обмежень, ні у вигляді параметра оптимізації, але які можуть мати суттєве значення для собівартості та екологічності виробництва та експлуатації заданого виробу.

Докладний всебічний аналіз "короткого списку" матеріалів дозволяє зробити заключний вибір матеріалу для заданого виробу.

*Приклад 2.1.* Розглянемо процедуру вибору на прикладі не пов'язаному з вибором матеріалів: вибір персонального комп'ютера для роботи в потужній CAD-CAE системі.

Етап трансляції (1) частково виконує розробник програмного забезпечення - визначає мінімальні вимоги до обладнання:

- підтримка операційної системи (наприклад Windows 7, 64 біт);
- потужність процесора (наприклад Intel i3);
- об'єм оперативної пам'яті (наприклад 8 GB);
- вільний об'єм жорсткого диску (наприклад 24 GB).

Остання вимога перетворюється користувачем, з врахуванням додаткової інформації, в об'єм диску, що знаходиться в межах від 500 GB до 2 TB.

Частину вимог формулює користувач - наприклад необхідна підтримка двох моніторів.

Вільними параметрами, на які не накладаються початкові обмеження можна вважати: виробника обладнання, розмір та колір системного блоку, наявність оптичного накопичувача.



Найважливішим є формулювання критерію оптимальності. В нашому випадку критерієм оптимізації може бути один з наступних:

- вартість системи;
- надійність системи (термін гарантії і її забезпечення);
- інтегральний показник, що включає вартість, надійність, продуктивність, тощо.

Етап відсіювання (2) передбачає виведення з розгляду усіх пропозицій ринку, які не відповідають сформульованим вимогам.

На етапі ранжування (3) усі комп'ютерні системи, що пройшли відсіювання розташовуються в порядку значень критерію оптимальності від найкращих до найгірших (від мінімальної до максимальної вартості чи від максимальної надійності до мінімальної надійності).

На етапі документування (4) необхідно зібрати доступну інформацію про декілька кращих варіантів. До такої інформації можуть бути віднесені: виробник, продавець, дизайн системного блоку, тощо. На основі аналізу додаткової інформації приймається заключне рішення про вибір комп'ютерної системи.

## 2.2 Формулювання обмежень

В більшості реальних задач вибору матеріалу трансляція вимог в обмеження передбачає докладний інженерний аналіз умов роботи.

Наприклад вимога до структурного елементу, який працює як жорстка колона (сприймає навантаження на стиснення), має конструктивно визначену площу поперечного перетину  $S=10^{-3}\text{м}^2$  та довжину  $l=2\text{м}$ , вимогами конструкції під дією навантаження  $F=10\text{ кН}$  повинна деформуватися не більше ніж на  $d=5\text{ мм}$ . Оскільки розміри елементу відомі, то умова жорсткості може бути записана як:

$$E \geq \frac{F \cdot l}{S \cdot d}, \quad (2.1)$$

де  $E$  - модуль пружності матеріалу, Па;  $F$  - навантаження на колону, Н;  $l$  - довжина колони, м;  $S$  - площа поперечного перетину,  $\text{м}^2$ ,  $d$  - допустиме зменшення розміру колони, м.

Для заданих вище умов:

$$E \geq \frac{F \cdot l}{S \cdot d} = \frac{10^3 \cdot 2}{10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = \frac{2}{5} \cdot 10^9 = 0,4 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Таким чином відповідне обмеження має бути записане як: мінімальне значення модуля пружності 0,4 ГПа, що складає досить незначну величину, і

залишає в розгляді практично усі сімейства матеріалів, включаючи більшість видів деревини, полімери та частину піноматеріалів.

Необхідно зазначити, що викладений підхід застосовують тоді, коли технічним завданням передбачені взаємодоповнюючі вимоги - розміри та механічні характеристики. З іншого боку очевидно, що формулювання функціональності виробу чи його елемента передбачає явне або неявне обмеження його розмірів. В кожному випадку інформація, необхідна для формулювання обмежень, визначається на етапі проектування об'єкту та його складових.

Разом з явним вказуванням значень для обмежень інструментом Limit, система CES передбачає можливість ситуативного формулювання обмежень. Таке завдання може виникнути на етапі концептуального проектування і відповідно пошуку матеріалу з найекстремальнішими характеристиками.

Наприклад є потреба обрати для подальшого аналізу групу матеріалів, з максимальним значенням питомого модуля пружності. На двокоординатному графіку "модуль пружності - густина" графічним способом можна обрати задану кількість матеріалів з відповідними властивостями (рис. 2.1). На рисунку показано внесення обмежень за густиною (близько 5 г/см<sup>3</sup>) та за модулем пружності (близько 200 ГПа). Штриховою вказано лінію однакових значень питомого модуля пружності ( $E/\rho$ ). Матеріали, які відібрано таким способом в подальшому можуть аналізуватись на екстремальне значення іншого показника - наприклад тріщиностійкості або теплопровідності.

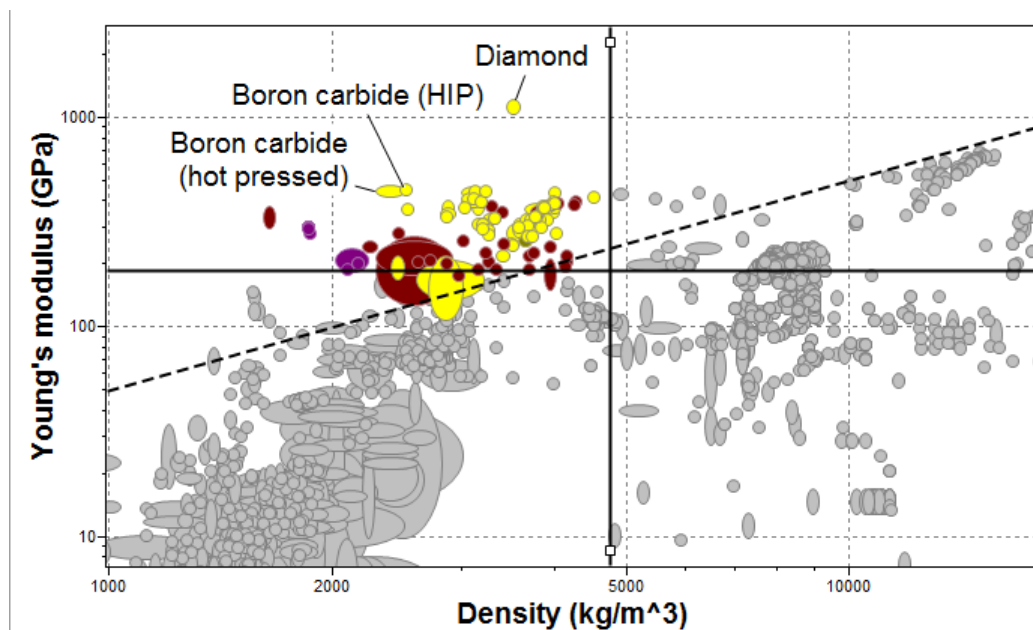


Рисунок 2.1 Застосування графічного способу формулювання обмежень

## 2.3 Вибір індексів матеріалу

Вибір індексу матеріалу - показника, за яким проводиться оптимізація, є одним з найважливіших кроків, що визначає результат усього відбору. Індекс матеріалу має бути пов'язаний з заданими обмеженнями, в іншому випадку необхідно просто обирати найбільше (або найменше) значення однієї з характеристик матеріалу. В ряді реальних систем індекс матеріалу безпосередньо визначає ряд обмежень, роботу з яким розглянуто вище.

Розглянемо характерний випадок формулювання індексу матеріалу. Нехай необхідно обрати матеріал для стержня заданої довжини, що працює на розтяг і витримує без руйнування задане навантаження  $F$ . При цьому необхідно досягти мінімальної маси такого стержня. Схему виробу показано на рисунку 2.2.

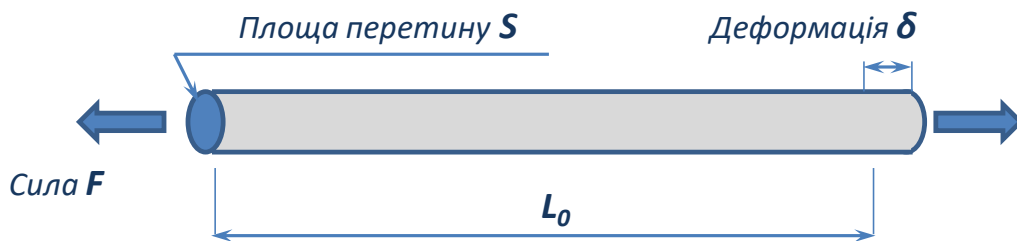


Рисунок 2.2 Схема навантаження стержня для визначення індексу.

Визначені властивості стержня:

**Функція:** Стержень, працює на розтяг без руйнування.

**Обмеження:** Задана довжина  $L_0$ , (геометричне обмеження)

Має витримувати розтягуючу силу  $F$  (функціональне обмеження)

**Мета:** Мінімізувати масу стержня  $m$ .

**Вільні змінні:** Площа перетину стержня  $S$ , вибір матеріалу.

Запишемо рівняння для цільової величини, виразивши її через інші характеристики виробу:

$$m = S \cdot L_0 \cdot \rho, \quad (2.2)$$

де  $m$  - маса виробу, цільове значення для мінімізації;  $S$  - площа перетину стержня;  $L_0$  - довжина стержня;  $\rho$  - густина матеріалу.

Довжина стержня фіксована,  $L_0 = \text{const}$ . Сила  $F$  відома. Змінними є значення площі перетину  $S$  та густини  $\rho$ . Мінімізувати масу можливо зменшуючи густину та/або зменшуючи площу перетину. Однак необхідно врахувати функціональне обмеження, яке може бути записане як:

$$F/S \leq \sigma_p, \quad (2.3)$$

де  $\sigma_p$  - напруження руйнування.

Скоротивши площу перетину  $S$  в рівнянні (2.2) та в нерівності (2.3), одержимо:

$$S = \frac{m}{L_0 \cdot \rho} \quad (2.4)$$

$$\frac{F \cdot L_0 \cdot \rho}{m} \leq \sigma_p \quad (2.5)$$

$$m \geq F \cdot L_0 \cdot \frac{\rho}{\sigma_p} \quad (2.6)$$

Таким чином: перші дві змінні в формулі (2.6) відповідають функціональному  $F$  та геометричному  $S$  обмеженням, а відношення густини до напруження руйнування є характеристикою матеріалу, яку необхідно мінімізувати. Зручніше задачу записати як пошук максимуму питомої міцності на розтяг:

$$\frac{\sigma_p}{\rho} \Rightarrow \max \quad (2.7)$$

Результат графічної оптимізації на основі бази даних (Level 1) може бути показаний рисунком 2.3.

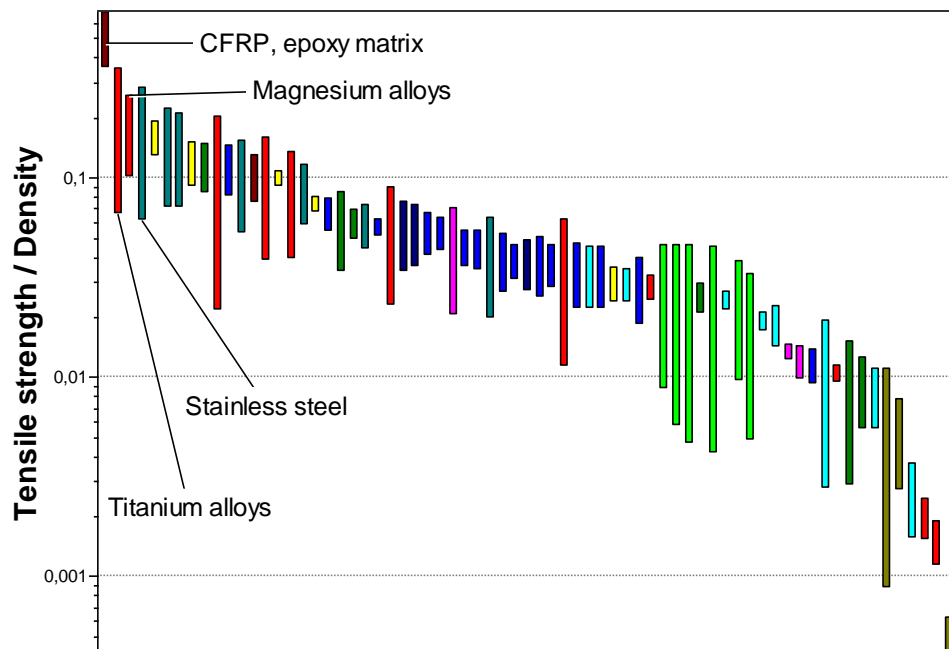


Рисунок 2.3 Приклад графічної оптимізації матеріалу за показником питомої міцності.

Розглянемо дещо змінену задачу: усі основні параметри співпадають з попередньою задачею, але змінюється мета: мінімізувати вартість стержня  $C$ . Рівняння цільового показника матиме вигляд:

$$C = C_m \cdot m = C_m \cdot S \cdot L_0 \cdot \rho, \quad (2.8)$$

де  $C_m$  - вартість одиниці маси матеріалу.

Після обчислень, аналогічних (2.4-2.6) одержимо:

$$C \geq F \cdot L_0 \cdot \frac{\rho \cdot C_m}{\sigma_p} \quad (2.9)$$

І, таким чином, задача зводиться до пошуку матеріалу, для якого:

$$\frac{\sigma_p}{\rho \cdot C_m} \Rightarrow \max \quad (2.10)$$

Результат графічної оптимізації на основі бази даних (Level 1) показаний на рисунку 2.4.

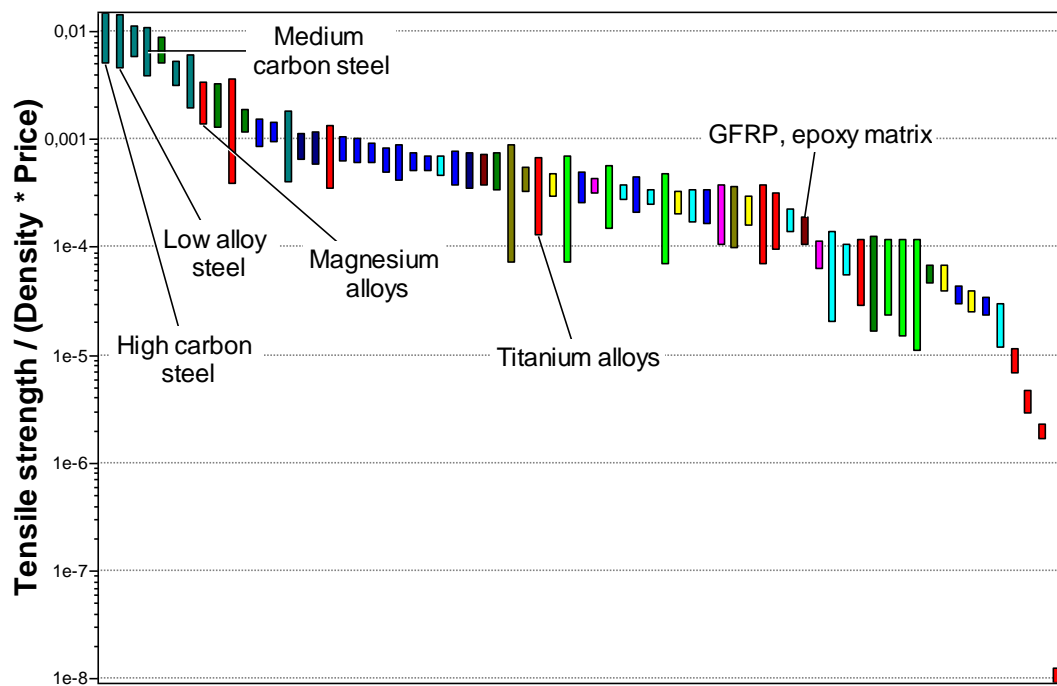


Рисунок 2.4 Графічна оптимізація матеріалу за показником міцності віднесеної до добутку ціни на густину.

Розглянемо ще один приклад - вибір матеріалу для балки, що працює на триточковий згин, як показано на рисунку 2.5. Необхідно обрати матеріал, що забезпечить найменшу масу балки.

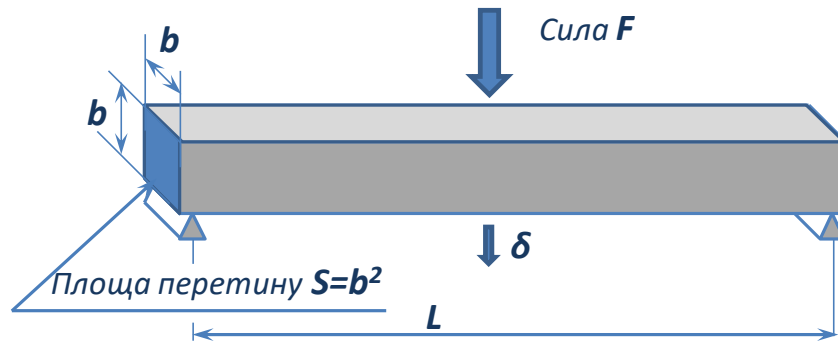


Рисунок 2.5 Схема навантаження балки на згин.

Визначені властивості балки:

**Функція:** Балка, що працює на триточковий згин без руйнування.

**Обмеження:** Задана довжина  $L$ , (геометричне обмеження)  
 Форма поперечного перетину - квадрат, (геометричне обмеження)  
 Має витримувати навантаження силою  $F$  без суттєвої деформації (функціональне обмеження)

**Мета:** Мінімізувати масу балки  $m$ .

**Вільні змінні:** Площа перетину стержня  $S$ , вибір матеріалу.

Рівняння цільової величини  $m$  можна записати як:

$$m = S \cdot L \cdot \rho = b^2 \cdot L \cdot \rho \quad (2.11)$$

Функціональне обмеження стосується можливості мінімально деформуватися під дією сили  $F$  і має вигляд обмеження жорсткості  $K$ :

$$K = \frac{C_2 \cdot E \cdot I}{L^3} \geq K^* \quad (2.12)$$

де  $C_2$  - константа, що визначається умовами навантаження;  $I$  - другий момент інерції перетину,  $K^*$  - критична (мінімально необхідна) жорсткість балки.

Другий момент інерції для квадратного перетину обчислюється за формулою:

$$I = \frac{b^4}{12} = \frac{S^2}{12} \quad (2.13)$$

Для заданих  $L$ ,  $K^*$ , рівняння для маси балки квадратного перетину записується:

$$m = \left( \frac{12 \cdot K^* \cdot L^3}{C_2} \right)^{1/2} \cdot (L) \cdot \left( \frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (2.14)$$

Таким чином, задача зводиться до наступної:

$$\frac{E^{1/2}}{\rho} \Rightarrow \max \quad (2.15)$$

Графічно, реалізувати оптимізацію (2.15) можна за допомогою двокоординатного графіка "Густина - модуль пружності" та градієнтної ліній вибору з нахилом 2 (рис. 2.6).

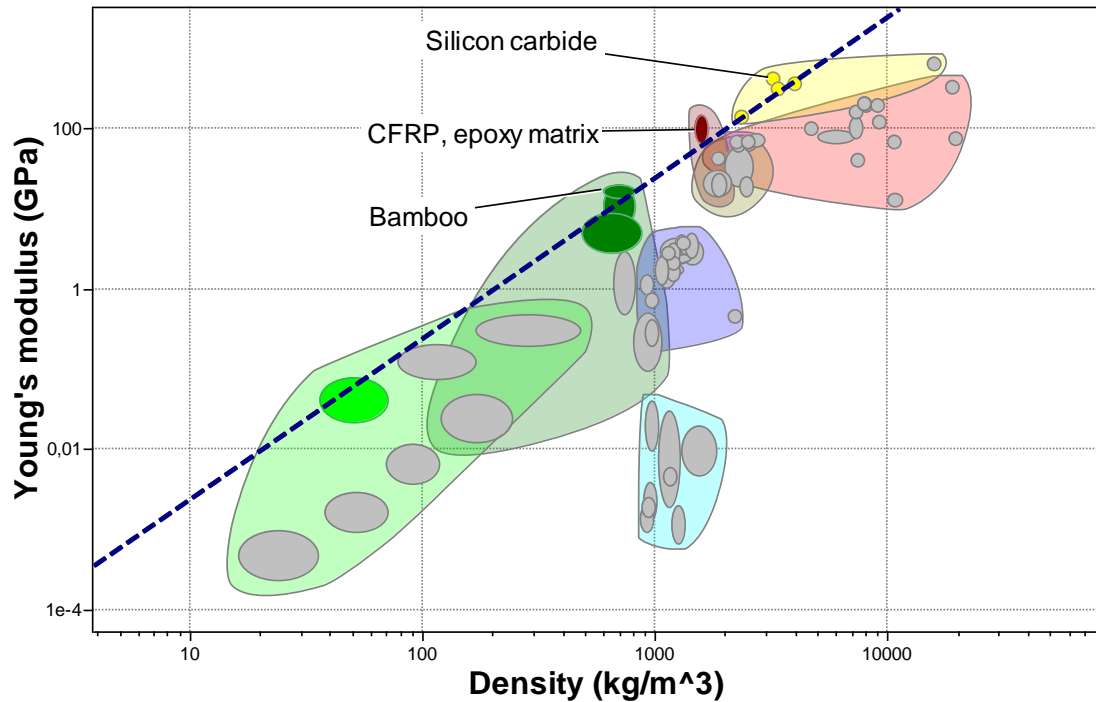


Рисунок 2.6 Графічна оптимізація матеріалу за показником роботи на згин за двовимірним графіком.

Таким чином аналіз різних умов навантаження, різних цілей оптимізації призводить до знаходження різних матеріалів, що найкращим чином відповідають завданню.

Узагальнюючи розглянуті приклади, можна зробити висновок, що типовий цільовий параметр  $P$  для оптимізації записується у вигляді:

$$P = \left[ \begin{pmatrix} \text{функціональні} \\ \text{вимоги, } Fn \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \text{геометричні} \\ \text{вимоги, } Gn \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \text{властивості} \\ \text{матеріалу, } Mp \end{pmatrix} \right] \quad (2.16)$$

Три групи параметрів на етапі формування індексу матеріалу мають бути розділені таким чином, щоб вираз для параметра ефективності (індексу) матеріалу записувався у вигляді добутку окремих функцій:

$$P = f_1(Fn) \cdot f_2(Gn) \cdot f_3(Mi) \quad (2.17)$$

Якщо це вдається зробити, то оптимальний вибір матеріалу залишається незалежним від інших груп параметрів - функціональних чи геометричних, множина оптимальних матеріалів буде однаковою для будь-яких функціональних та/чи геометричних умов, що дозволяє суттєво скоротити розв'язок задачі.

Для спрощення формулювання індексів матеріалів та характерних обмежень довідкова система містить набір найхарактерніших варіантів, частину з яких наведено та прокоментовано нижче.

## 2.4 Індеси матеріалу при механічному навантаженні

Найбільш поширений клас задач з вибору матеріалів, в якому виділяється 4 основних підкласи, що формуються двома типами обмеження - жорсткість не нижче заданої або міцність не нижче заданої та двома варіантами цільової функції - мінімальна маса виробу або мінімальна вартість виробу. Кінцевий вигляд індекса матеріалу визначається схемою навантаження виробу.

Навантаження стержня на розтяг, приклади якого розглянуто вище, характеризується схемою навантаження, показаною на рис.2.7.



Рисунок 2.7 Схема навантаження стержня на розтяг.

Характерні варіанти формулювання індексів матеріалу:

Мета	Обмеження	Індекс для максимізації
Мінімум маси при відомій міцності	Міцність обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{\sigma_y}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості	Жорсткість обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{E}{\rho}$
Мінімум вартості при відомій міцності	Міцність обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{\sigma_y}{C_m \cdot \rho}$
Мінімум вартості при відомій жорсткості	Жорсткість обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{E}{C_m \cdot \rho}$



Позначені величини:

$\sigma_y$  - Межа плинності матеріалу, Yield strength (elastic limit);

$E$  - Модуль пружності, Young's modulus;

$\rho$  - Густина, Density;

$C_m$  - Вартість одиниці маси матеріалу, Material price.

Навантаження стержня (колони) на стиснення значною мірою аналогічне розглянутому, однак дещо складніше у зв'язку з можливістю повздовжнього згину колони. Схему навантаження показано на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 Схема навантаження стержня на стиснення.

Характерні варіанти формулювання індексів матеріалу:

Мета	Обмеження	Індекс для максимізації
Мінімум маси при відомій міцності	Міцність обмежена, довжина та форма перетину відомі, площа перетину вільна	$\frac{\sigma_c}{\rho}$
	Міцність обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{\phi^{1/2} \sigma_y}{\rho}$
	Міцність на повздовжній згин обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{\left(\phi^{1/2} \sigma_y\right)^{2/3}}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості	Жорсткість обмежена, довжина та форма перетину відомі, площа перетину вільна	$\frac{E}{\rho}$
	Жорсткість обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{(E \cdot \phi)}{\rho}$
	Жорсткість до повздовжнього згину обмежена, довжина та форма перетину відомі, площа вільна	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Мінімум вартості при відомій міцності	Міцність обмежена, довжина та форма перетину відомі, площа перетину вільна	$\frac{\sigma_y}{C_m \cdot \rho}$
	Міцність обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{\phi^{1/2} \sigma_y}{C_m \cdot \rho}$

	Міцність на повздовжній згин обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{\left(\varphi^{1/2} \sigma_y\right)^{2/3}}{C_m \cdot \rho}$
Мінімум вартості при відомій жорсткості	Жорсткість обмежена, довжина та форма перетину відомі, площа перетину вільна	$\frac{E}{C_m \cdot \rho}$
	Жорсткість обмежена, довжина відома, площа та форма перетину вільні	$\frac{(E \cdot \varphi)}{C_m \cdot \rho}$
	Жорсткість до повздовжнього згину обмежена, довжина та форма перетину відомі, площа вільні	$\frac{E^{1/2}}{C_m \cdot \rho}$

Позначені величини:

$\sigma_c$  - Міцність на стиснення, Compressive strength

$\varphi$  - коефіцієнт форми, Shape factor.

Вибір матеріалу в задачах на стиснення стержня характерний необхідністю аналізу системи на повздовжню стійкість. Коефіцієнт форми - показник, що узагальнює співвідношення між довжиною навантаженого стержня та центральним моментом інерції поперечного перетину: труба з площею поперечного перетину  $S$  більш стійка до повздовжнього згину ніж суцільний стержень з тією ж площею перетину.

Навантаження елемента (валу) на зсув при крученні.



Рисунок 2.9 Схема навантаження валу на зсув при крученні.

Характерні варіанти формулювання індексів матеріалу:

Мета	Обмеження	Індекс для максимізації
Мінімум маси при відомій міцності	Міцність обмежена; довжина та форма перетину відомі, площа перетину вільна	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
	Міцність обмежена; довжина та товщина стінки відомі; зовнішній радіус вільний	$\frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho}$
	Міцність обмежена; довжина та зовнішній радіус відомі; товщина стінки вільна	$\frac{\sigma_y}{\rho}$

Мінімум маси при відомій жорсткості	Міцність обмежена; довжина та форма перетину відомі; площа перетину вільна	$\frac{G^{1/2}}{\rho}$
	Міцність обмежена; довжина та товщина стінки відомі; зовнішній радіус вільний	$\frac{G^{1/3}}{\rho}$
	Міцність обмежена; довжина та зовнішній радіус відомі; товщина стінки вільна	$\frac{G}{\rho}$

Позначена величина:

$G$  - Модуль зсуву, Shear modulus

Як у попередніх розглянутих випадках, з метою мінімізації вартості, у формулі індексу густина  $\rho$  замінюється на добуток густини на вартість одиниці маси  $\rho \cdot C_m$ . Цей підхід залишається дійсним для усіх індексів.

Навантаження балки на згин.

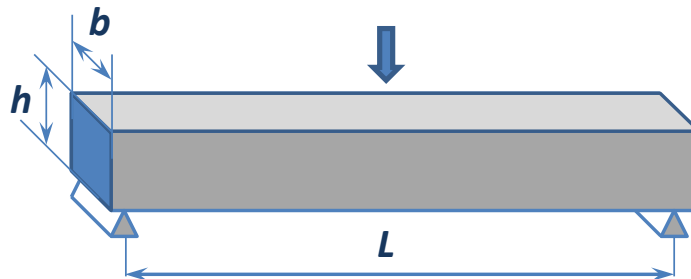


Рисунок 2.10 Схема навантаження балки на згин.

Оптимізація вибору матеріалу балки, що працює на згин є однією з найбільш розповсюджених і, одночасно найбільш розгалужених задач. Характерні варіанти формулювання індексів матеріалу:

Мета	Обмеження	Індекс для максимізації
Мінімум маси при відомій міцності	Міцність обмежена; довжина та форма перетину відомі, площа перетину вільна	$\frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho}$
	Міцність обмежена; довжина відома; форма та площа перетину вільні	$\frac{\left(\phi^{1/2} \sigma_f^{2/3}\right)}{\rho}$
	Міцність обмежена; довжина, товщина $h$ , форма перетину відомі; ширина $b$ вільна	$\frac{\sigma_f}{\rho}$
	Міцність обмежена; довжина, товщина $h$ відомі, ширина $b$ та форма перетину вільні	$\frac{\left(\phi^{1/2} \sigma_f\right)}{\rho}$

	Міцність обмежена; довжина, ширина <b>b</b> , форма перетину відомі; товщина <b>h</b> вільна	$\frac{\sigma_f^{1/2}}{\rho}$
	Міцність обмежена; довжина, ширина <b>b</b> відомі, товщина <b>h</b> та форма перетину вільні	$\frac{(\varphi \sigma_f)^{1/2}}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості	Жорсткість обмежена; довжина та форма перетину відомі, площа перетину вільна	$\frac{E_f^{1/2}}{\rho}$
	Жорсткість обмежена; довжина відома; форма та площа перетину вільні	$\frac{(\varphi \cdot E_f)^{1/2}}{\rho}$
	Жорсткість обмежена; довжина, товщина <b>h</b> , форма перетину відомі; ширина <b>b</b> вільна	$\frac{E_f}{\rho}$
	Жорсткість обмежена; довжина, товщина <b>h</b> відомі, ширина <b>b</b> та форма перетину вільні	$\frac{(\varphi \cdot E_f)}{\rho}$
	Жорсткість обмежена; довжина, ширина <b>b</b> , форма перетину відомі; товщина <b>h</b> вільна	$\frac{E_f^{1/3}}{\rho}$
	Жорсткість обмежена; довжина, ширина <b>b</b> відомі, товщина <b>h</b> та форма перетину вільні	$\frac{(\varphi \cdot E_f)^{1/3}}{\rho}$

Позначені величини:

$\sigma_f$  - Межа міцності на згин, Flexural strength (modulus of rupture)

$E_f$  - Модуль згину, Flexural modulus.

Модуль згину обчислюється з використанням результатів випробувань на 3- або 4- точковий згин, під час якого в матеріалі утворюється комбінація стискаючих, розтягуючих та зсувних напружень.

Навантаження плоских плит на згин та стиснення показано на рис. 2.11, і узагальнює форми індексів матеріалів, розглянуті вище для одновимірних об'єктів

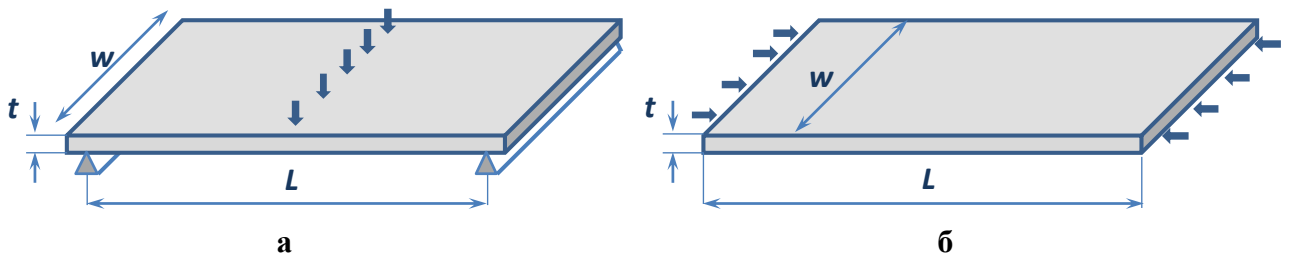


Рисунок 2.11 Схема навантаження плоскої плити на згин (а) та стиснення(б).

Характерні варіанти формулювання індексів матеріалу:

Мета	Обмеження	Індекс для максимізації
Мінімум маси при відомій міцності (згин)	Міцність обмежена, довжина та ширина відомі, товщина вільна	$\frac{\sigma_f^{1/2}}{\rho}$
Мінімум маси при відомій міцності (стиснення)	Міцність обмежена, довжина та ширина відомі, товщина вільна	$\frac{\sigma_c^{1/2}}{\rho}$
	Міцність на повздовжній згин обмежена, довжина та ширина відомі, товщина вільна	$\frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості (згин)	Жорсткість обмежена, довжина та ширина відомі, товщина вільна	$\frac{E_f^{1/3}}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості (стиснення)	Жорсткість на повздовжній згин обмежена, довжина відома, товщина вільна	$\frac{E_f}{\rho}$

Навантаження оболонок показане на рис. 2.12. Характерними є варіанти навантаження оболонок розподіленими силами (тиском) ззовні або зсередини.

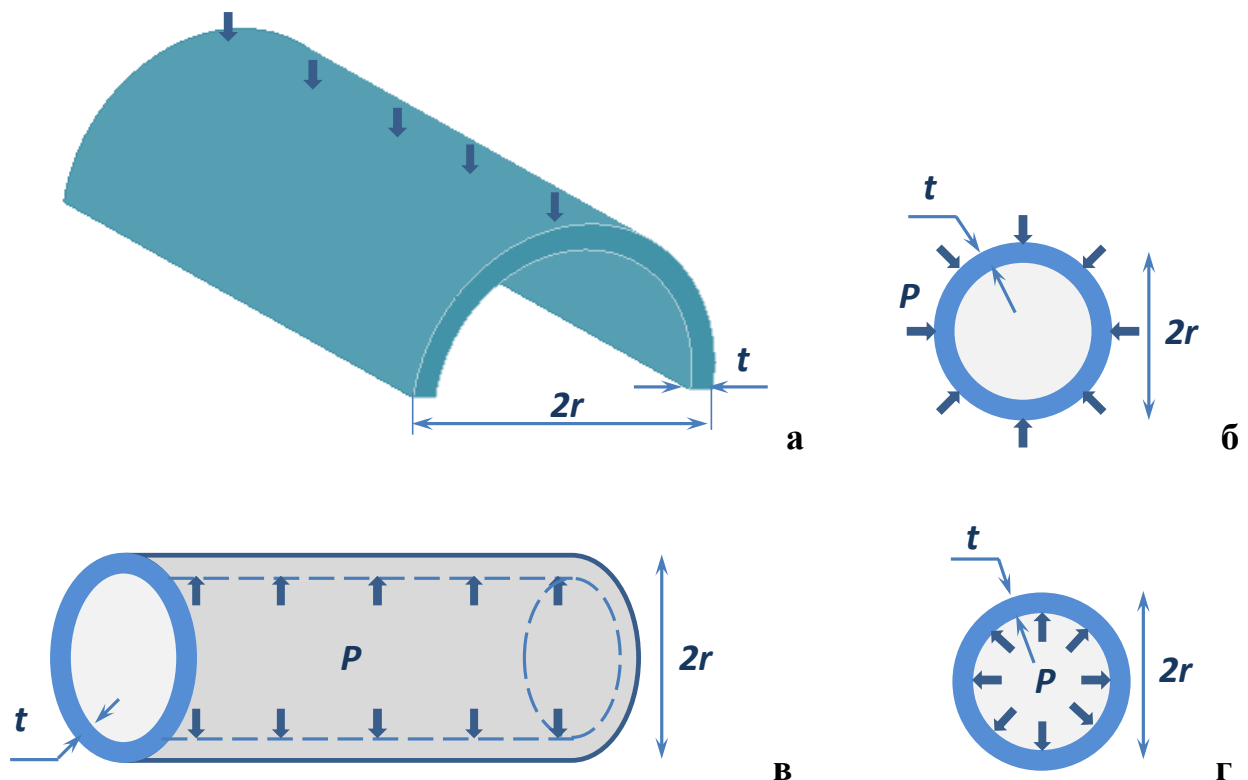


Рисунок 2.12 Схема навантаження оболонок.

- а. навантаження лінійно розподіленою силою криволінійної півоболонки;
- б. навантаження сфери зовнішнім тиском;
- в. навантаження циліндричної труби внутрішнім тиском,
- г. навантаження сфери внутрішнім тиском

Формулювання індексів матеріалу має наступний вигляд:

Мета	Обмеження	Індекс для максимізації
Мінімум маси при відомій міцності (рис.2.12 а)	Міцність обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{\sigma_f^{1/3}}{\rho}$
Мінімум маси при відомій міцності (рис.2.12 б)	Міцність обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{\sigma_c}{\rho}$
	Міцність на зминання обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
Мінімум маси при відомій міцності (рис.2.12 в)	Міцність обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{\sigma_y}{\rho}$
Мінімум маси при відомій міцності (рис.2.12 г)	Міцність обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{\sigma_y}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості (рис.2.12 а)	Жорсткість обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{E_f^{1/3}}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості (рис.2.12 б)	Жорсткість на зминання обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
	Плавучість (виштовхувальна сила) обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{E}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості (рис.2.12 в)	Жорсткість обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{E}{\rho}$
Мінімум маси при відомій жорсткості (рис.2.12 г)	Жорсткість обмежена, радіус $r$ відомий, товщина вільна	$\frac{E}{(1-\nu) \cdot \rho}$

Позначена величина:  $\nu$  - коефіцієнт Пуасона.

## 2.5 Спеціальні випадки вибору індексів матеріалу

Розглянуті вище випадки індексів матеріалу стосуються порівняно простих задач стійкості проти статичного механічного навантаження та оптимізації маси виробу, або інших характеристик, які є похідними від маси.

Нижче наведено приклади визначених індексів для випадків динамічного навантаження в різноманітних умовах.

Формулювання індексу матеріалу для виготовлення пружин.

Пружини є незамінними елементами практично усіх механічних, електромеханічних та інших систем, суттєво відрізняються формою та зусиллям. Існують пружини що працюють на згин (як показано на рис. 2.10, 2.11 а.), на скручування (звичайна циліндрична пружина або торсіон, схема роботи рис. 2.9), на інші, більш складні форми деформування. Стандартні вимоги до матеріалу пружини - накопичення та вивільнення значної (можливо максимальної) енергії без руйнування за заданих умов навантаження.

Визначені властивості пружини:

**Функція:** Механічний елемент заданої форми, що здатний пружно деформуватися.

**Обмеження:** Не руйнуватися і не переходити в зону пластичного деформування для усіх прикладених напружень, що менші напруження руйнування ( $\sigma < \sigma_{\text{руйн}}$ )

**Мета:** Мінімізувати об'єм пружини  $v$ ,  
або Мінімізувати масу пружини  $m$ .

**Вільні змінні:** Вибір матеріалу.

Запропоноване формулювання не є повним з точки зору конструювання вузла, що містить пружину, адже важливим є жорсткість пружини - відношення міри її деформування до прикладеного навантаження. Але ці показники можуть бути задані конструктором.

Незалежно від форми навантаження пружини, механічна енергія, що накопичується в одиниці об'єму пропорційна деформації і знаходиться за рівнянням:

$$W_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{E} \quad (2.18)$$

Враховуючи що  $\sigma < \sigma_{\text{руйн}}$ ,

$$W_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{\text{руйн}}^2}{E} \quad (2.19)$$

Для листових та балочних пружин механічна енергія записується рівняннями 2.20 та 2.21

$$W_v = \frac{1}{4} \cdot \frac{\sigma_{\text{руйн}}^2}{E} \quad (2.20)$$

$$W_v = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_{руйн}^2}{E} \quad (2.21)$$

Очевидно, що перший коефіцієнт у формулі залежить від форми навантаження, визначається конструкційно і не має відношення до вибору матеріалу. Таким чином для усіх випадків вибору матеріалів для пружин при необхідності досягнення мінімального об'єму індекс матеріалу можна записати як:

$$\frac{\sigma_{руйн}^2}{E} \Rightarrow \max, \quad (2.22)$$

або для випадку досягнення мінімальної маси:

$$\frac{\sigma_{руйн}^2}{\rho \cdot E} \Rightarrow \max, \quad (2.23)$$

Застосування обраного індексу (мінімальний об'єм (2.22)) при графічному виборі дає результат, показаний на рисунку 2.13.

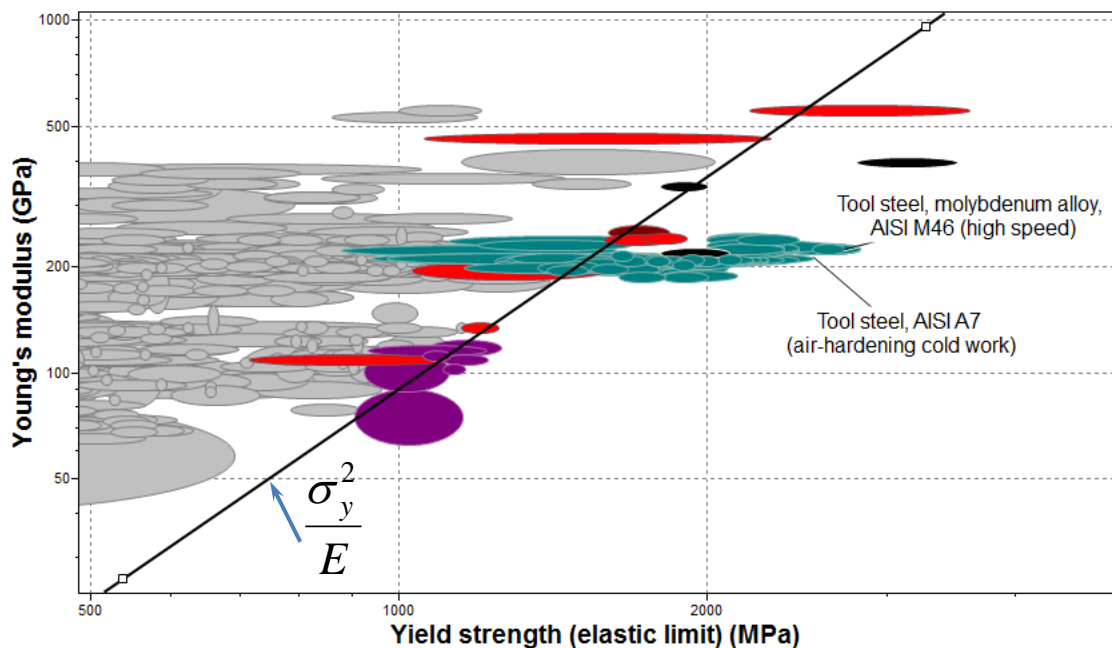


Рисунок 2.13 Графічний вибір матеріалу з максимальним відношенням квадрату міцності до модулі пружності

Інший приклад динамічного навантаження - матеріал для елементів, що працюють в умовах вібрації. Такі елементи можуть мати два протилежних призначення:

- демпфери - гасять коливання, забезпечують мінімальну амплітуду коливань та швидке їх згасання;



- резонатори - елементи, що забезпечують значну амплітуду коливань, використовуються для генерації звуку або подібних задач.

Вібраційні характеристики визначаються співвідношенням модуля пружності до густини, а також значенням коефіцієнта механічних втрат - безрозмірною величиною, що характеризує кількість енергії деформації, яка не повертається при розвантаженні попередньо навантаженого елемента. Індeksi матеріалів, для роботи в якості демпферів коливань (забезпечують мінімальну амплітуду коливань) мають наступний вигляд:

Мета	Обмеження	Індекс для максимізації
Мінімум амплітуди коливань, схема навантаження (рис.2.7)	Довжина відома, форма та площа перетину вільні	$\frac{\eta \cdot E}{\rho}$
Мінімум амплітуди коливань, схема навантаження (рис.2.10)	Довжина відома, форма перетину фіксована, площа перетину вільна	$\frac{\eta \cdot E_f^{1/2}}{\rho}$
	Довжина відома, форма та площа перетину вільні	$\frac{\eta \cdot (\varphi \cdot E_f)^{1/2}}{\rho}$
	Довжина відома, ширина w відома, форма перетину фіксована, товщина t вільна	$\frac{\eta \cdot E_f^{1/3}}{\rho}$
Мінімум амплітуди коливань, схема навантаження (рис.2.11 а)	Довжина відома, ширина w відома, форма перетину фіксована, товщина t вільна	$\frac{\eta \cdot E_f^{1/3}}{\rho}$

Позначена величина:

$\eta$  - коефіцієнт механічних втрат (демпфуючий коефіцієнт).

Для вибору матеріалу резонаторів, максимальної амплітуди коливань, записані індекси необхідно мінімізувати.

### Контрольні запитання

1. Які основні етапи вибору матеріалу?
2. Що таке індекс матеріалу?
3. Чи правильне твердження, що етап трансляції виконується програмою CES автоматично? Чому?
4. Складіть список обмежень та список вільних параметрів для матеріалу інструменту для свердління загартованої сталі.
5. Складіть список обмежень та список вільних параметрів для матеріалу гальмівних накладок.

6. Які показники матеріалу для п. 3 можуть потребувати оптимізації? Знайдіть формулу індекса матеріалу для запропонованих варіантів оптимізації.

## Практичні завдання

### I Побудова графіків

I.1 Для бази даних MaterialUniverse Level1 побудувати однопараметричний графік за значенням параметру Тріщиностійкість (Fracture toughness).

- Позначити в полі графіка (підписати засобами CES) 3-4 матеріали;
- Знайти та позначити в полі графіка матеріал Magnesium alloys (Магнієві сплави): правий клік миші на відповідному матеріалі у вікні Results → лівий клік на виборі Label;
- Використовуючи інструмент "Вибір прямокутником" (BOX selection tool) знайти чотири матеріали, що мають найвище значення параметра тріщиностійкості.

I.2 Для бази даних MaterialUniverse Level1 побудувати однопараметричний графік за значенням параметру Ціна матеріалу за кілограм. При побудові замість специфікації назви властивості по осі X, натиснути кнопку "Advanced...", обрати закладку Tree та послідовно перенести (кнопка Insert) усі групи матеріалів у праву частину вікна.

- Встановити одиниці вимірювання ціни в EUR, USD, UAH. Оцінити курс національної валюти, "зашитий" в програму (враховуючи що курс відповідає часу виходу версії програми);
- Оцінити, який клас матеріалів (на рівні бази Level1) має найбільший розкид відповідної властивості;
- Позначити в полі графіка матеріали з мінімальним та максимальним значенням параметра для кожного класу.

I.3 Перетворити попередній графік, таким чином, щоб по осі Y було відкладено ціну не за одиницю маси, а ціну за одиницю об'єму, для чого:

- Натиснути кнопку Properties (#1 на рис.2.8), в закладці Y-axis обрати Advanced..., і за допомогою вбудованого редактора формул створити функцію  $[Price] \cdot [Density]$ . Відобразити графік.
- Визначити, які з матеріалів мають найбільшу та найменшу ціну за одиницю об'єму.

1.4 Для бази даних MaterialUniverse Level2 побудувати двокоординатний графік (bubble chart) залежності межі плинності (Yield strength) за віссю Y від густини (Density) за віссю X.

- Застосувати контейнери (інструмент #10 на рис. 2.8) виділивши класи матеріалів.
- Визначити, чи представлено на графіку метал, який має межу плинності менше 10 МПа.
- Використати вибір прямокутником для знаходження матеріалів з межею плинності більше 600 МПа та густиною менше  $2 \text{ г/см}^3$  ( $2000 \text{ кг/м}^3$ ).
- Визначити два матеріали, які мають найбільше значення відношення межі плинності до густини.

1.5 Для бази даних MaterialUniverse Level1 побудувати однокоординатний графік властивості [Yield strength] / [Density] - використовувати режим Advanced...

- Змінити графік за наступною процедурою:- правий клік на надпису Stage 1: Yield strength (elastic limit)... у групі 2. Selection Stages в правій частині вікна програми;
- обрати Edit Stage в контекстному меню;
- обрати закладку X-Axis, і використовуючи режим Advanced... ввести для осі X функцію [Young's modulus]/[Density].
- На одержаному графіку знайти та позначити матеріали: CFRP та GFRP. В базі даних знайти та опрацювати інформацію про ці матеріали.

## **II Опрацювання характеристик матеріалів**

II.1 Використовуючи CES Edupack Level 1. графічним способом знайти:

- матеріал з найвищою густиною;
- матеріал з найнижчим модулем пружності;
- полімер з найвищою густиною;
- наближене значення відношення модуля пружності деревини виміряного вздовж волокон до виміряного поперек волокон;
- наближене значення модуля пружності еластомерів.

II.2 Використовуючи CES Edupack Level 1. графічним способом знайти:

- найдешевший (за одиницю маси) матеріал з модулем більшим, ніж 1 ГПа;
- найдешевший метал;
- найдешевший полімер;

- визначити, що дорожче магнієві сплави чи алюмінієві сплави.

### **III Оптимізація індексів матеріалів**

**III.1** Для схеми навантаження 2.10, відомої сили 20 кН та довжини балки 0,3 м, в графічному режимі визначте матеріал, який:

- а) забезпечить мінімальну масу балки;
- б) забезпечить мінімальний об'єм балки;
- в) забезпечить мінімальну вартість балки;

**III.2** В транспортному машинобудуванні важлива не тільки (і не стільки) міцність матеріалу а й питома міцність. Використовуючи базу даних Level 2:

- а) Запишіть в порядку спадання питомої міцності (відношення межіплинності до густини матеріалу) п'ять матеріалів з категорії “метали та сплави”, що мають найвище значення питомої міцності. Те ж саме виконайте для категорії “полімери та еластомери”.
- б) Матеріали з високими значеннями відношення питомої міцності до вартості будуть одночасно відносно міцними, легкими та недорогими. Згенеруйте log-log графік питомої міцності до вартості матеріалу. Позначте 10 матеріалів, записаних в п. а). Застосуйте вибір нахиленою лінією з коефіцієнтом 1, для визначення 2 найкращих (з 5 попередньо обраних) представників кожної з груп “метали та сплави” та “полімери та еластомери”.

**III.3** Циліндричний стержень довжиною  $L$  та діаметром  $d$  деформується розтягуючим навантаженням  $T$ . Стержень не повинен демонструвати ні пластичної деформації ні зменшення діаметру більше ніж  $\Delta d$ .

- а) Виразіть наведений опис специфікації умов роботи як критерій вибору матеріалу, як кількісне обмеження на властивість матеріалу, щоб він задовольняв вимогам.

Для подальшої роботи з задачею використовуйте базу даних Level 2.

- б) Згенеруйте log-log графік з осями: горизонтальна — межа плинності (Yield strength); вертикальна — відношення модуля пружності до коефіцієнта Пуассона. Використайте інструмент Limit для матеріалів, що відповідають критерію п. а), якщо:  $L=120$  мм,  $d=15$  мм,  $T=35$  кН і  $\Delta d=1.2 \cdot 10^{-2}$  мм. Позначте два матеріали, що відносяться до кераміки, один — до композитів та два — до металів.

в) Визначте: скільки матеріалів з п. б) будуть задовільняти обмеженню густини: не більше  $3.5 \text{ г/см}^3$ . Ідентифіуйте 1 представника кераміки та 1 композиційних матеріалів, що задовольняють і вимогам міцності і вимогам маси.

г) Визначте одну спільну рису в хімічному складі усіх матеріалів, що задовільнили вимогам п. в), що їх відрізняє від матеріалів, які виключено з розгляду між п. б) та в). Зробіть висновок.

д) Проранжуйте матеріали, що пройшли п. г) за ціною. Для кожного з цих матеріалів визначте вартість матеріалу, що потрібний для виготовлення стержня, і відповідно значення вагового коефіцієнта.

**III.4** Різні матеріали можуть мати дуже різну ефективність застосування залежно від того, що необхідно мінімізувати: масу чи відносне видовження (при розтягу). Для наступного завдання приймаємо, що площу поперечного перетину стержня обрана такою, що стержень можна навантажувати до межі плинності заданим навантаженням.

а) Коли необхідно мінімізувати масу виробу, при заданій несучій здатності необхідно максимізувати відношення міцності до густини - питому міцність. Згенеруйте двовимірний графік залежності міцності від густини для металів, полімерів, кераміки та композитів. В якій частині графіка знаходяться найвищі значення питомої міцності. Опишіть різницю питомої міцності серед цих категорій матеріалів.

б) Коли необхідно мінімізувати відносне видовження - індексна величина це відношення міцності до модуля пружності (під навантаженням, коли в стержні не спостерігається пластична деформація). Згенеруйте двовимірний графік залежності міцності від модуля пружності для металів, полімерів, кераміки та композитів. В якій частині графіка знаходяться найнижчі значення відношення міцності до жорсткості.

**III.5** Молярна теплоємність речовини, виміряна при постійному тиску  $c_p$ , завжди чисельно більше ніж молярна теплоємність тієї ж речовини виміряна при постійному об'ємі,  $c_v$ . Величина різниці, віднесена до значення - магнітуда різниці, записується рівнянням:

$$\frac{c_p - c_v}{c_p} = \frac{9 \cdot T \cdot B \cdot \alpha_l^2}{\rho \cdot c_s} \quad (4.1)$$

де  $T$  - термодинамічна температура, К;  $B$  - модуль всебічного стиснення (bulk modulus);  $\alpha_l$  - лінійний коефіцієнт термічного розширення;  $\rho$  - густина матеріалу,  $c_s$ - питома теплоємність. Цей вираз є дійсним для твердих тіл, рідин та газів.

- а) Власними словами, використавши 2 - 3 речення, поясніть: чому  $c_p > c_v$ .
- б) Використовуючи базу даних Хімічні елементи (Elements) побудуйте line-line графік залежності правої частини рівняння (4.1) від атомного номера елемента. (Необхідно: одиниці вимірювання обрати "SI (Consistent)"). Для газів відсутні значення модуля всебічного стиснення, тому вони будуть відсутні на графіку.
- в) Знайдіть значення рівняння (4.1) для типових металів: алюміній, залізо, мідь, титан. Визначтесь з магнітудою різниці, явно оцінивши одиниці вимірювання усіх величин і враховуючи, що  $1 \text{ Па} \equiv 1 \text{ Дж/м}^3$ .
- г) Для моноатомного ідеального газу:  $\gamma$ , і де  $R$  - універсальна газова стала. Як це співвідноситься із значеннями магнітуди, одержаними для більшості твердих тіл.
- д) Обчисліть значення рівняння (4.1) для ртуті (mercury), єдиного елемента, представленого на графіку в рідкому стані. Порівняйте одержане значення зі значеннями для одноатомного газу та характерних металів. Зробіть висновки стосовно того, чи поріватиметься закономірність на інші матеріали (композити, сплави, полімери, скло).

## **Комп'ютерний практикум 3.**

### **Оптимальний вибі за наявності протиріч**

**Мета практикуму:** Практично засвоїти принципи оптимізації вибору матеріалів за допомогою системи CES Edupack при наявності протиріч

#### **3.1 Протиріччя цілей вибору матеріалів**

Задачі оптимізації чи оптимального вибору за одним детермінованим критерієм є досить рідкісним випадком в технічних задачах. В реальних задачах, ситуацію часто необхідно оптимізувати одночасно за двома або більше критеріями. Прямий розв'язок таких задач ускладнений або неможливий, і в теорії оптимізації прийнято перетворювати задачу до досягнення нею стану однокритеріальної.

Ситуація з наявністю декількох критеріїв оптимізації зустрічається і при виборі матеріалів. Вибір має задовольняти декілька різних конфліктуючих обмежень. Відповідальні деталі конструкції літака повинні мати мінімальну масу, з обмеженнями жорсткості, втомної міцності, в'язкості та геометрії. Одноразовий посуд для гарячих напоїв повинен мати мінімальну вартість, при дотриманні обмежень жорсткості, міцності та теплопровідності. Розглянуті випадки містять один (кожен) критерій оптимізації - маса чи вартість, при наявності декількох обмежень, і оптимальний вибір можна зробити як показано в попередньому розділі.

Найхарактернішими є випадки пошуку матеріалу з максимальними значеннями експлуатаційних характеристик (міцності, жорсткості, твердості, зносостійкості) і одночасно екстремальними значеннями фізичних властивостей (наприклад густина). На уже існуючий конфлікт цілей може накладатися необхідність мінімальної вартості рішення, екологічних вимог, тощо.

Другий клас проблем містить більше одного критерія оптимізації, що призводить до більш складних проблем. Вибір матеріалу, який є оптимальним за одним критерієм звичайно не є оптимальним за другим критерієм. У більшості випадків найлегший матеріал, що задовільняє механічним вимогам, не виявиться найдешевшим, і навпаки. Для вирішення такої задачі необхідно знайти компроміс між масою виробу та його ціною. Традиційно для розв'язання задач з конфліктуючими критеріями оптимізації застосовуються методи, що базуються на вагових коефіцієнтах або на нечіткій логіці, недоліком яких є врахування суб'єктивних суджень. Іншими підходами, що допомагають

розв'язати протиріччя між обмеженнями та цільовими показниками є метод активних обмежень та метод штрафних функцій. На рисунку 3.1 показано схематичну класифікацію задач з конфліктуючими факторами та рекомендовані методи їх розв'язку.



Рисунок 3.1 Схема способів оптимізації вибору матеріалу за наявності конфліктів.

### 3.2 Розв'язання конфліктуючих обмежень

Як показано в розділі 2 (п.2.3-2.5) формули індексів матеріалів одержують за участю символів, що відповідають обмеженням. При наявності в задачі обмежень жорсткості - у формулах індексів фігурує модуль пружності або модуль зсуву. У випадку обмежень міцності - межа плинності або межа міцності.

Більшість реальних задач вибору матеріалів переобмеженні - містять декілька обмежень, що мало би приводити до формулювання декількох індексів матеріалів.

Розглянемо приклад. Необхідно обрати матеріал для стержня, що працює на розтяг, у якого:

- обмежено жорсткість (модуль пружності  $> 100$  ГПа);
- обмежено міцність (межа плинності  $> 250$  МПа);
- введено ряд обмежень технологічного та експлуатаційного характеру, які не впливають на виведення індексу матеріалу: корозійна стійкість, теплопровідність, тощо.

Цільовий показник: мінімальна маса виробу.

Формулювання індексів матеріалу, для заданої форми навантаження, докладно розглянуто в практикумі 2.



Параметр оптимізації (мінімізації)  $m$  записується рівнянням:

$$m = S \cdot L \cdot \rho \quad (3.1)$$

Для заданої жорсткості  $K^*$ , одержуємо:

$$K^* = \frac{E \cdot S}{L^*}, \quad (3.2)$$

Підставивши  $S$  з рівняння (3.2) в рівняння (3.1), параметр оптимізації записуємо:

$$m_K = L^{*2} \cdot K^* \cdot \left( \frac{\rho}{E} \right) \quad (3.3)$$

Звідки індекс матеріалу при обмеженні жорсткості:

$$M_K = \frac{\rho}{E} \Rightarrow \min \quad (3.4)$$

В формулах 3.2-3.3 позначено:  $K^*$  - задану жорсткість елементу,  $L^*$  - задану довжину елементу.

З іншого боку - для заданого навантаження руйнування  $F_f^*$ :

$$F_f^* = \sigma_y \cdot S, \quad (3.5)$$

і відповідно параметр оптимізації та індекс матеріалу при обмеженні міцності:

$$m_\sigma = L^* \cdot F_f^* \cdot \left( \frac{\rho}{\sigma_y} \right) \quad (3.6)$$

$$M_\sigma = \frac{\rho}{\sigma_y} \Rightarrow \min. \quad (3.7)$$

Логічно вважати, що матеріал, що відповідає заданому критерію оптимізації, повинен забезпечувати мінімум зведеного критерію:

$$\tilde{m} = \max(m_K, m_\sigma) \Rightarrow \min \quad (3.8)$$

Розв'язок мінімаксної задачі (3.8) ускладнюється дискретно-розрідженим характером простору властивостей матеріалів. З цієї причини, найбільш адекватним вважається метод, що передбачає визначення значень кінцевого показника оптимальності для заданих (лімітованих) геометричних розмірів та матеріалів, що мають близькі до оптимальних значення для обох заданих індексів.

Додамо до заданих вище умов задачі наступні:

Задана довжина стержня  $L^* = 1$  м, жорсткість стержня  $K^* = 3 \cdot 10^7$  Н · м, навантаження руйнування стержня  $F_t^* = 10^5$  Н.

Підставимо ці значення для попередньо обраних матеріалів (середньовуглецевої сталі, алюмінієвого сплаву 6061 Al та титанового сплаву Ti-6Al-4V) в рівняння 3.3 та 3.6 відповідно. Табличні та розраховані дані зведемо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 Оптимізація вибору матеріалу для легкого, жорсткого, міцного стержня,  $L=1$  м.

Матеріал	Густина, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль пружності E, ГПа	Межа плинності $\sigma_y$ , МПа	Маса стержня $m_1$ , кг (3.3)	Маса стержня $m_2$ , кг (3.6)	Зведений критерій, $\tilde{m}$ , кг
Середньовуглецева сталь 1030, (0,3% C)	7850	210	340	1,12	2,31	2,31
Сплав Al 6061	2700	70	110	1,16	2,45	2,45
Сплав Ti-6Al-4V	4420	115	820	1,15	0,54	1,15

Таким чином, оптимальним матеріалом для виготовлення стержня з заданими характеристиками є титановий сплав Ti-6Al-4V.

Однак варто змінити один параметр - довжину стержня на 3 м, як ситуація зміниться (Табл. 3.2). Оптимальні показники за масою має середньовуглецева сталь.

Таблиця 3.2 Оптимізація вибору матеріалу для легкого, жорсткого, міцного стержня,  $L=3$  м.

Матеріал	Густина, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль пружності E, ГПа	Межа плинності $\sigma_y$ , МПа	Маса стержня $m_1$ , кг (3.3)	Маса стержня $m_2$ , кг (3.6)	Зведений критерій, $\tilde{m}$ , кг
Середньовуглецева сталь 1030, (0,3% C)	7850	210	340	10,1	6,93	10,1
Сплав Al 6061	2700	70	110	10,4	7,36	10,4
Сплав Ti-6Al-4V	4420	115	820	10,4	1,62	10,4

При довжині стержня 1 м, більш критичним було значення питомої міцності, яка значно вища в титанового сплаву. При збільшенні довжини, критичною стає питома жорсткість, яка дещо вища в сталі.

Описаний аналітичний підхід може бути замінений графічною реалізацією. Для множини матеріалів, що задовольняють основним обмеженням будуюмо двокоординатний графік з осями маса  $m_2$  - маса  $m_1$  (рис. 3.2)<sup>3</sup>.

### 3.3 Розв'язання конфліктуючих цілей

Як показано вище, реальні задачі досить часто містять більше одного критерія оптимізації - параметра, для якого необхідно знайти екстремальне (мінімальне або максимальне) значення цільової функції. Інтуїтивно зрозумілі критерії оптимізації:

- Мінімальна маса виробу - загальна цільова функція при проектуванні виробів, які рухаються, або є елементами рухомих систем. Для будь-якого транспортного засобу від велосипеда до космічних апаратів серед цільових функцій - мінімізація маси.

---

<sup>3</sup> При побудові графіка, показаного на рисунку 3.2 доцільно зробити наступні налаштування:  
- для обох осей явно задати лінійний тип та межі зміни параметрів;  
- параметри  $m_1$  та  $m_2$  записати за допомогою режиму Advanced... графічного середовища реалізувавши формули 3.3 та 3.6;  
- для констант жорсткості  $K^*$  та міцності  $F^*$  змінити порядок величин, враховуючи, що за замовчуванням одиниці вимірювання для модуля пружності ГПа, а для міцності МПа;  
- масштабні значки (еліпси) замінити мінімальними позначками середніх значень (Tools - Settings - Numbers) - відмітка в віконці Display data ranges as average values.

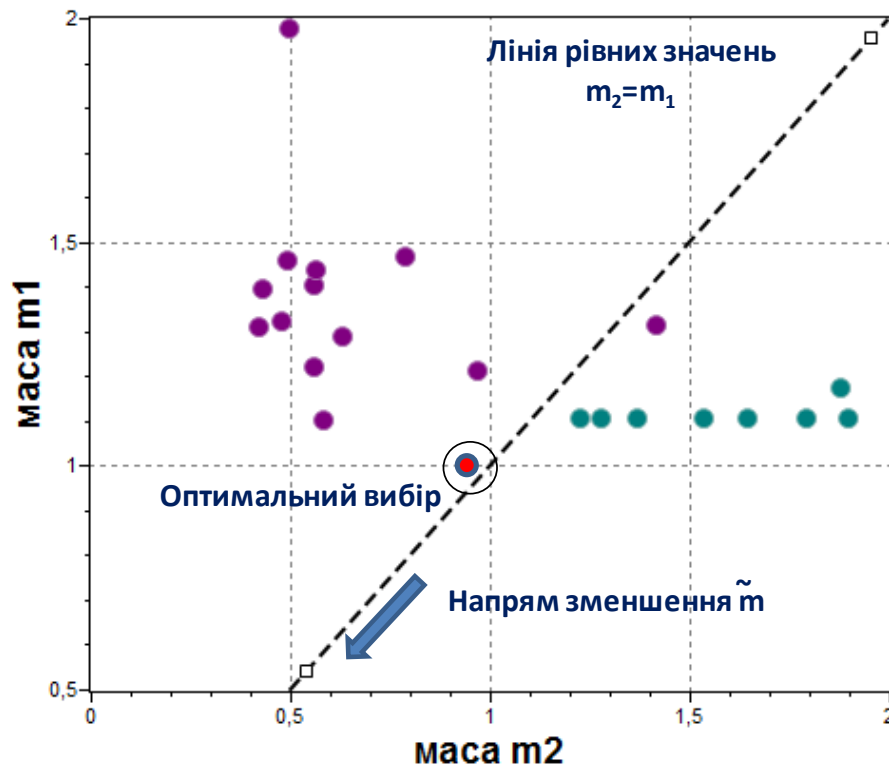


Рисунок 3.2 Графічна реалізація оптимального вибору легкого, жорсткого, міцного стержня,  $L=1$  м.

- Мінімальний об'єм - цільова функція, що фігурує серед вимог до компонентів сучасного обладнання. Зменшення об'єму компонентів - це скорочення кількості матеріалів, що витрачаються безпосередньо на виріб, а також зменшення об'єму корпусних деталей, що формують робочий простір.
- Мінімальна вартість - вимога, що ставиться до найбільш масових виробів.

Вимогою часу є включення до списку критеріїв оптимізації мінімізації впливу матеріалу чи виробу на навколишнє середовище.

Перераховані критерії тісно переплітаються між собою. Наприклад мінімізація об'єму окремих механічних деталей, при збереженні їх функціональності, дозволяє зменшити об'єм, а значить і масу корпуса автомобіля, що, в свою чергу може позитивно відбитись як на його вартості так і на екологічності його використання.

Звичайно існує цілий ряд інших параметрів, що можуть розглядатись як критерії оптимізації. Це стосується максимізації енергії що акумулюється в пружині чи в джерелі електричного струму, максимізації зносостійкості в визначених умовах експлуатації, тощо.

Таким чином, практично в кожному реальному випадку може спостерігатись завдання оптимізувати вибір як мінімум за двома різними

критеріями. Конфлікт між такими критеріями виникає через те, що оптимальний вибір за одним критерієм не буде таким же за іншим.

На відміну від розглянутого вище підходу до розв'язання конфліктуючих обмежень, конфліктуючі критерії оптимізації вимірюються в різних одиницях, і тому не можуть бути порівняні між собою.

**Компромісний підхід.** Розглянемо задачу, в якій необхідно обрати матеріал, що мінімізує одночасно вартість (показник ефективності P1) та масу виробу (показник ефективності P2). Також на виріб накладено обмеження функціонального та/або геометричного характеру - наприклад вимоги до максимальної робочої температури, корозійна стійкість в заданому середовищі та інші. Іншими словами: необхідно обрати матеріал, що одночасно задовільняє усім застосованим умовам, та досягає достатньо низьких, але не обов'язково оптимальних значень критеріїв оптимізації P1 та P2.

Графічно результат відбору в координатах P1 - P2 показано на рис. 3.3.

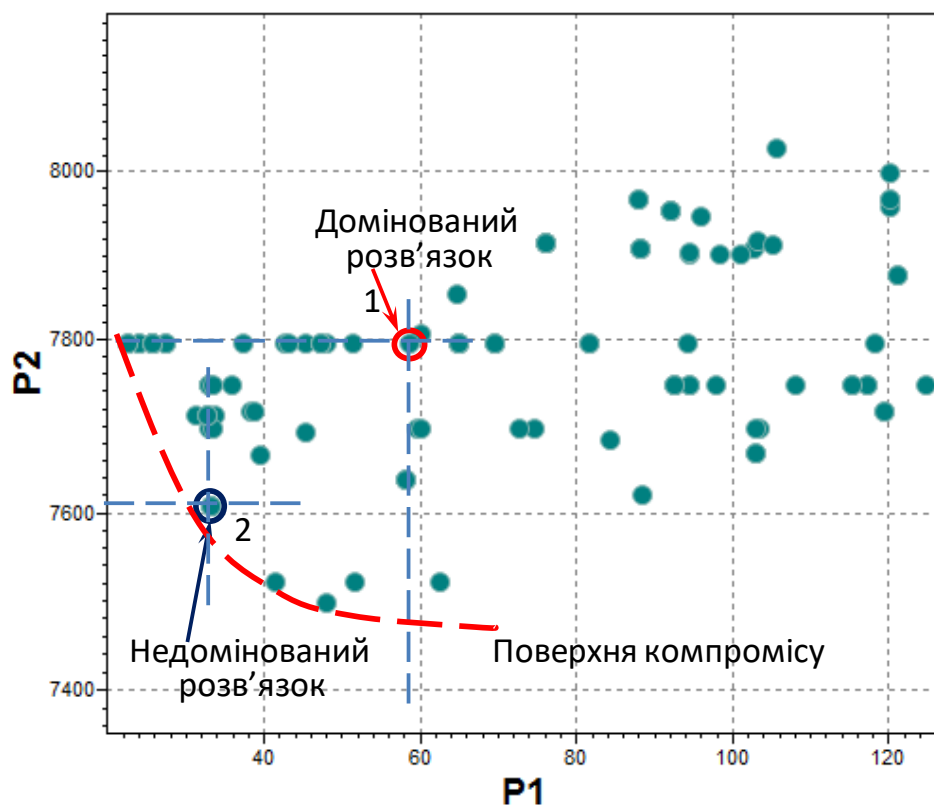


Рисунок 3.3 Схема вибору матеріалу за двома критеріями оптимізації..

Очевидно, що вибір (рішення), що мінімізує густину ( $P_2$ ) не є найкращим з точки зору вартості ( $P_1$ ), і навпаки. На графіку присутні варіанти вибору, що явно не є оптимальними за жодним з критеріїв, наприклад точка 1 - прямокутник з верхньою правою вершиною в цій точці містить варіанти

вибору, кожен з яких краще точки 1 хоча б за одним критерієм. Такий розв'язок називають домінованим - існує множина інших розв'язків, що домінують над ним. Варіант вибору 2 характерний тим, що прямокутник з верхньою правою вершиною в цій точці, не містить інших варіантів вибору. Такий розв'язок називають недомінованим. Криву, що проходить через точки недомінованих розв'язків називають лінією (або поверхнею) компромісу, а саму множину таких точок - множиною Парето. Оптимальний вибір належить множині Парето.

Ситуація, наведена на рис. 3.3 передбачає застосування одного з трьох підходів:

1. Якщо множина Парето містить досить мало варіантів вибору - провести документування кожного з них, маючи на меті обрати матеріал за "додатковими показниками"
2. Перевести один з критеріїв оптимізації в обмеження, і обрати матеріал, оптимальний за іншим критерієм оптимізації. Для прикладу, відмовляємось від оптимізації вартості, визначивши максимальне значення вартості, яке нас задовільняє. Після обираємо обираємо матеріал, оптимальний за масою (густиною) (рис. 3.4).
3. Застосувати метод штрафних функцій для проведення оптимізації за усіма критеріями.

**Метод штрафних функцій** є одним з поширених в теорії оптимізації і застосовується для розв'язку задач умовної та багатокритеріальної оптимізації. Випадки, що розглядаються нами, повною мірою відповідають постановці задачі багатокритеріальної оптимізації. В той час, як розглянутий вище компромісний підхід передбачає знаходження найкращого компромісу між критеріями оптимізації, метод штрафних функцій дозволяє об'єднати два або більше критерія в одну цільову функцію, сформульовану таким чином, що її мінімум відповідає найкращому розв'язку задачі.

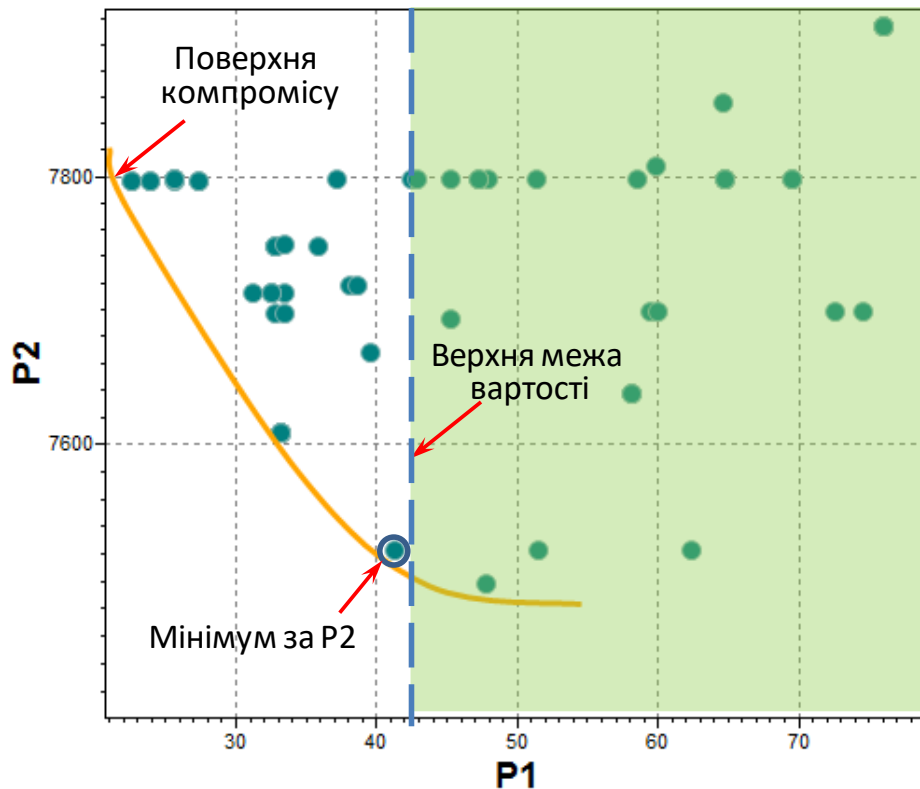


Рисунок 3.4 Схема вибору матеріалу з переведенням критерію оптимізації в обмеження.

Для проведення оптимізації формують локально лінійну штрафну функцію вигляду:

$$Z = a_1 \cdot P_1 + a_2 \cdot P_2 + \dots + a_n \cdot P_n \quad (3.9)$$

Найкращий вибір матеріалу відповідає мінімальному значенню функції  $Z$ . Константи  $a_1, \dots, a_n$  називають ваговими або масштабними коефіцієнтами. Крім чисельного значення вони мають розмірність, яка приводить відповідний критерій до розмірності штрафної функції  $Z$ . Вагові константи можуть бути визначені як частинні похідні від штрафної функції за відповідним критерієм, за умови, що значення решта критеріїв є константами:

$$a_i = \left( \frac{\partial Z}{\partial P_i} \right)_{P_j, j \neq i} \quad (3.10)$$

Поширеною є ситуація, коли один з критеріїв  $P$  є вартість  $C$ , яку необхідно мінімізувати, тому доцільно вимірювати усю штрафну функцію в грошових одиницях, оцінюючи наскільки зросте загальна вартість рішення при збільшенні маси чи об'єму виробу на одиницю. В такому випадку відповідний коефіцієнт  $a_1 = 1$ , а вираз штрафної функції записується:

$$Z = C + a_2 \cdot P_2 + \dots + a_n \cdot P_n \quad (3.11)$$

Повернувшись до попереднього прикладу, де передбачалась одночасна мінімізація вартості та маси, штрафна функція записується у вигляді:

$$Z = C + a \cdot m \quad (3.12)$$

або, виділивши окремо масу:

$$m = -\frac{1}{a} \cdot C + \frac{1}{a} Z \quad (3.13)$$

Рівняння 3.13 визначає лінійну залежність між масою  $m$  та вартістю  $C$ , яка може бути відображена на графіку вибору у вигляді серії паралельних ліній, що відповідають різним значенням штрафної функції (рис. 3.5). Нахил ліній штрафної функції рівний константі рівняння 3.13 ( $-1/a$ ). Значення штрафної функції зменшується у напрямку лівого нижнього кута, найменше значення відповідає оптимальному вибору матеріалу.

**Відносні штрафні функції.** В реальному виробництві досить часто зустрічаються випадки вибору нового матеріалу для уже існуючих зразків техніки з метою покращення службових характеристик. В такій ситуації виглядить доцільним порівняти ефективність застосування нового матеріалу та матеріалу, який уже застосовується. Для цього можна застосувати відносну штрафну функцію вигляду:

$$Z^* = \frac{C}{C_0} + a^* \cdot \frac{m}{m_0}, \quad (3.14)$$

де індекс 0 вказує на характеристики матеріалу, який уже використовується, а зірочка (\*) - що відповідні величини безрозмірні.



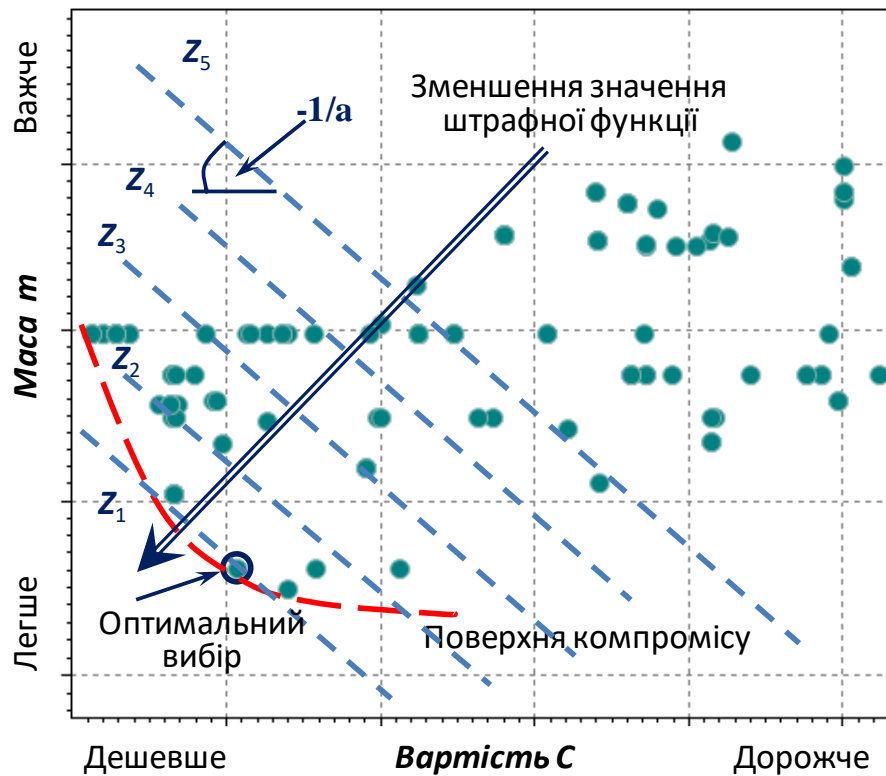


Рисунок 3.5 Схема вибору матеріалу з застосуванням штрафної функції.

Константа біля відношення маси ( $a^*$ ) показує наскільки покращення значення відповідного показника (маси) вплине на покращення ефективності в цілому. Наприклад, якщо прийняти  $a^* = 1$ , то при збереженні значення  $Z^*$ , зменшення маси вдвічі відповідає збільшенню ціни у два рази:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta m}{m_0}. \quad (3.15)$$

На рисунку 3.6 показано компромісний графік у відносних координатах, що відповідають дробам у рівності 3.15. Відносно точки з координатами (1, 1), що відповідає матеріалу, який уже використовується у полі графіка виділяються 4 сектори - А, В, С та D. Сектор D містить виключно доміновані розв'язки, які однозначно гірші ніж той, що уже застосовується. Сектори В та С містять розв'язки кращі за базовий за одним з показників але гірші за іншим - В: дешевші але важчі; С: легші але дорожчі.

Розв'язки, що розташовані в секторі А кращі базового за обома показниками. Оптимальні розв'язки, очевидно, лежать на компромісній поверхні у секторі А, залежно від значення показника  $a^*$ , що демонструється нахилом штрихових прямих.

В усіх випадках застосування методу штрафних функцій ключовим залишається правильний вибір обмінного коефіцієнту (коефіцієнтів)  $\alpha$ .

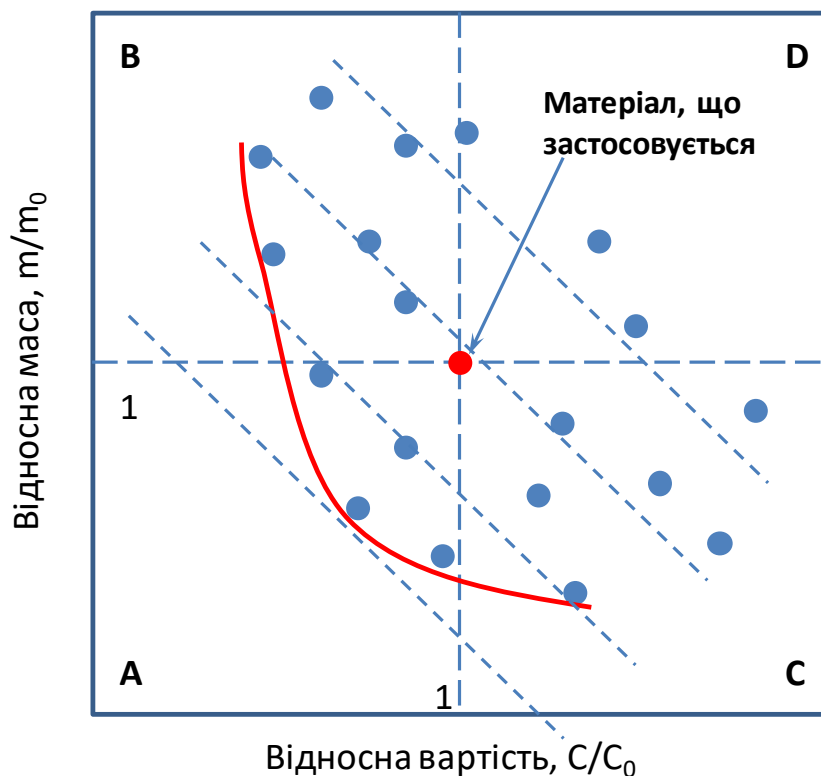


Рисунок 3.6 Схема компромісного графіку у відносних координатах.

#### ***Вибір значення обмінних (вагових) коефіцієнтів.***

Обмінний коефіцієнт є мірою того наскільки зростає значення штрафу при збільшенні на одиницю значення відповідної властивості матеріалу. Значення обмінного коефіцієнта та його знак залежать від умов окремого випадку. В якості прикладу можна навести вибір обмінних коефіцієнтів для параметра маси для транспортних систем різного призначення.

У транспортних системах, чи інших рухомих об'єктах, надлишкова маса виробу, додатково до вартості самого матеріалу, призводить до збільшення витрат палива на переміщення відповідного об'єкту. Причому чим більш екстримальним є засіб та умови його використання, тим більше є вплив збільшення маси. Так, витрати пального, а значить витрати на експлуатацію зі збільшенням маси для легкового автомобіля менші ніж для літака; для комерційного літака менші ніж для швидкісного військового літака; для будь-якого літака менші ніж для космічних транспортних засобів.

Для правильного вибору обмінних коефіцієнтів застосовують усі наявні засоби: досвід попередніх розробок, інженерну інтуїцію, ретельний інженерний аналіз проблемної ситуації. Значення обмінного коефіцієнта для маси для

різних транспортних систем наведено в таблиці 3.3. Відповідні значення одержано як шляхом інженерного аналізу так і з досвіду ефективного застосування матеріалів у попередніх розробках.

Крім розглянутих способів вибору значень обмінних коефіцієнтів можна застосувати інший підхід. Розглянемо вибір матеріалу для виготовлення велосипеда з конкуруючими цільовими функціями: масою, яка повинна бути мінімальною та ціною, яка також повинна бути мінімальною. До розгляду візьмемо вузький набір матеріалів, які можуть демонструвати достатню міцність та жорсткість при невисокій масі та ціні: звичайні сталі, леговані сталі, алюмінієві сплави, титанові сплави та композиційні матеріали (CFRP). Компромісний графік показано на рис. 3.7.

Таблиця 3.3 Значення обмінних коефіцієнтів для різних видів транспортних систем

Вид транспортної системи	Обмінний коефіцієнт <sup>4</sup> , $a$ , US\$/кг	Ефективні матеріали
Легкові автомобілі	1-2 (3-6) <sup>5</sup>	Сталь
Великовагові автомобілі	5-20	Сталь, алюмінієві сплави
Комерційні літаки	100-500	Алюмінієві сплави, композити
Військові надзвукові літаки	500-1000 (2000)	Алюмінієві сплави, титанові сплави, композити
Космічні системи	3000-10000	Композити

<sup>4</sup> За матеріалами Ashby M. F. Material selection in mechanical design, 4<sup>th</sup> edition, Butterworth Heinemann, Oxford, 2011.

<sup>5</sup> За матеріалами Unit 8. Objectives in conflict: trade off methods and penalty functions, Ashby M. F., Department of Engineering University of Cambridge. [Презентація], [web-доступ: <http://teachingresources.grantadesign.com/Presentations/PPTOBJEN16>]

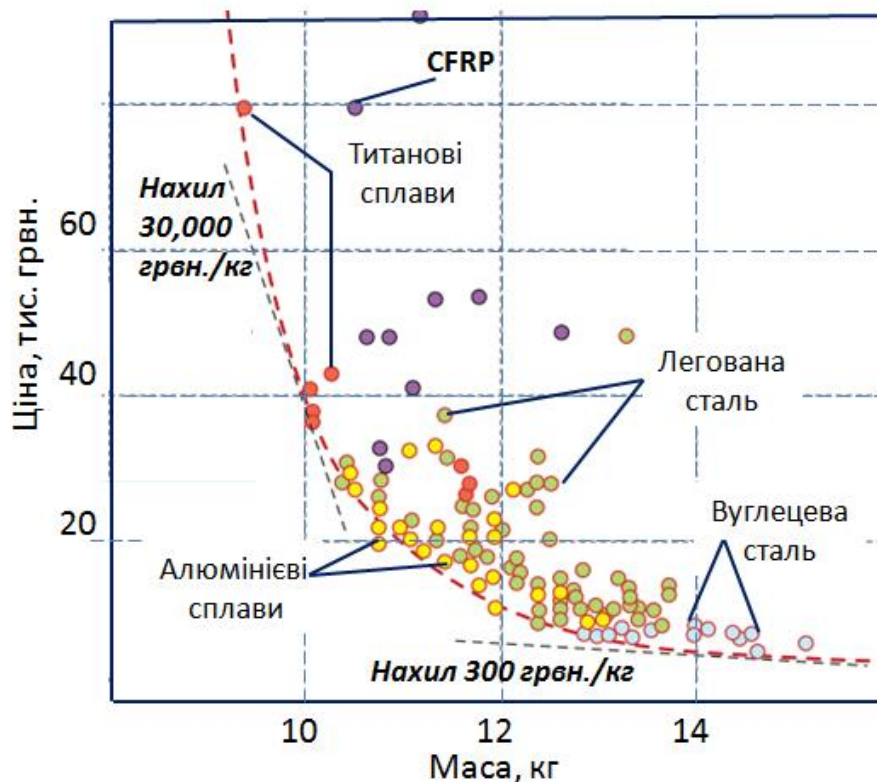


Рисунок 3.7 Схема компромісного графіку вибору матеріалу для виготовлення велосипеда.

Дотичні до лінії компромісу, проведені у будь-якій точці дають оцінку обмінного коефіцієнту. Обмінний коефіцієнт змінюється від 300 гривень за кілограм (і навіть менше) до 30000 гривень за кілограм. Очевидно, що для звичайного велосипеда обирати матеріал, що відповідає вищому з наведених значень обмінного коефіцієнту недоцільно, але для спортивних велосипедів для найвищих спортивних досягнень така ціна одного кілограма виглядає досить прийнятною.

### Контрольні запитання

1. Як наявність різних параметрів оптимізації (конфлікту обмежень) впливає на складність задачі та порядок її розв'язку?
2. Вибір матеріалу для транспортних систем це зазвичай:
  - розв'язання конфлікту обмежень;
  - розв'язання конфлікту критеріїв;
  - безконфліктна задача
3. В чому полягає компромісний підхід до розв'язку задач з конфліктом критеріїв?
4. Яке обмеження існує для застосування компромісного підходу?
  - 2 цільових функції;
  - 3 цільових функції;

- довільна кількість цільових функцій але не більше двох активних обмежень.

5. Які основні варіанти перетворення задачі існують при конфлікті цільових функцій?

6. Множина Парето містить

- доміновані розв'язки;
- недоміновані розв'язки;
- не містить розв'язків.

7. Яку кількість критеріїв оптимізації можна об'єднати використовуючи метод штрафних функцій?

8. В яких випадках доцільно застосовувати відносні штрафні функції?

## Практичні завдання

### *І Енергія маховика*

Маховик - найчастіше циліндричний об'єкт з віссю обертання, який застосовується для накопичення енергії у формі кінетичної енергії власного обертання. Якщо колесо маховика має масу  $m$ , форму суцільного циліндра з радіусом  $r$  і обертається зі швидкістю  $\omega$  (радіан/секунда) навколо своєї осі, то його кінетична енергія визначається формулою:

$$E_k = \frac{m \cdot r^2 \cdot \omega^2}{4}$$

Міра ефективності маховика є його енергія розділена на його масу – питома енергія, Дж/кг.

$$E_{sp} = \frac{E_k}{m} = \frac{r^2 \cdot \omega^2}{4} \quad (3.16)$$

Один з факторів, що обмежують швидкість обертання маховика є міцність матеріалу, з якого він виготовлений. Колесо маховика піддається розтягувальним напругам в периферичній області, які називають напруженнями розтягу обруча ротора, що обчислюється за рівнянням:

$$\sigma_0 = \rho \cdot r^2 \cdot \omega^2 \quad (3-17)$$

де  $\rho$  - густина матеріалу маховика.

Приймаючи до уваги, що обчислене напруження не повинно перевищувати межу плинності матеріалу маховика  $\sigma_y$  і комбінуючи залежності

(3-16) та (3-17), ефективність маховика може бути записана через міцність та густину матеріалу:

$$E_{sp} = \frac{\sigma_y}{4\rho} \quad (3-18)$$

а) Використовуючи базу даних Level 2, вибір з: Edu Level 2: Materials, та одиниці вимірювання в режимі SI (Consistent) згенеруйте одновимірний графік питомої межі плинності за категоріями: Метали та сплави, Кераміка та скло, Полімери та еластomers та Композити і інш... Використовуйте логарифмічний масштаб для вертикальної осі. Позначте чотири матеріали з найвищими значеннями питомої міцності (межі плинності) для кожної категорії, а на окремому аркуші - ті ж матеріали та інтервал їх питомої міцності.

Перетворимо рівняння (3-18) шляхом логарифмування:

$$\log \sigma_y = \log \rho + \log(4E_{sp}) \quad (3-19)$$

б) Згенерувати log-log двокоординатний графік залежності межі плинності (МПа) від густини (кг/м<sup>3</sup>). Використовуючи лінію вибору з нахилом  $a=1$  для визначення матеріалів з питомою енергією (3-18) не нижче 0.036 МПа/(кг/м<sup>3</sup>). (Матеріал вважається таким, що пройшов відбір, якщо будь-яка точка його еліпса пройде відбір).

в) Сформувати таблицю питомої енергії матеріалів, що пройшли відбір б), проранжувавши їх від найбільшого до найменшого.

г) Сформувати таблицю втіленої енергії<sup>6</sup> ("embodied energy") з розділу "Eco properties" для тих же матеріалів, проранжувавши їх від найменшого до найбільшого

## ***II Енергія пружини***

Питома енергія пружної деформації (modulus of resilience)  $U_r$  є мірою енергії на одиницю об'єму, яку матеріал може накопичувати шляхом пружної деформації без руйнування та/або пластичної деформації:

$$U_r = \frac{\sigma_y^2}{2E} \quad (3-20)$$

<sup>6</sup> Зауваження щодо одиниць вимірювання

$$1.00 \frac{MPa}{kg \cdot m^{-3}} = 1.00 \frac{MJ}{kg} = 278 \frac{W \cdot h}{kg}$$

а) Продемонструйте, що залежність (3-20) може бути перетворена в лінійну залежність форми:

$$y = mx + b$$

Для перетворень рекомендовано застосовувати заміни:

$$y = \log \sigma_y$$

$$x = \log E$$

$$m = 0.5$$

$$b = 0.5 \cdot \log(2U_r)$$

б) Використовуючи базу даних Level 2, набір: EduLevel 2: Materials та одиниці вимірювання в режимі SI (Consistent) згенеруйте log-log графік залежності межі плинності від модуля пружності. Додайте лінію вибору, що відповідає питомій енергії пружної деформації 50 МПа. Запишіть чотири матеріали із значеннями вище або рівними 50 МПа. До якої категорії усі вони належать?

в) Переформатуйте графік з частини б) використовуючи лінію 0,5 МПа. Запишіть по два матеріали зі значеннями більше або рівними 0,5 МПа з наступних категорій:

- полімери;
- чорні метали
- кольорові метали
- кераміка
- композити

### ***III Питома енергія пружної деформації***

Відпалений сплав Ti-6Al-4V відомий тим, що має високу міцність при порівняно низькому модулі пружності. Це надає сплаву високого значення питомої енергії пружної деформації  $\frac{\sigma_y^2}{2E}$ .

а) Використовуючи базу даних Level 2 згенеруйте двовимірний графік залежності міцності  $\sigma_y$  до модуля  $E$  в log-log осях для металів, полімерів, кераміки та композитів. Використовуючи лінію вибору, знайдіть матеріали, в яких питома енергія пружної деформації пересищує відповідне значення для відпаленого Ti-6Al-4V.

б) В кожній категорії (метали, полімери, кераміка та композити) знайдіть два матеріали, що мають високі значення питомої енергії пружної деформації. Проранжуйте їх від найнижчого до найвищого за вартістю за одиницю маси.

Після цього проранжуйте їх від найнижчої до найвищої вартості за одиницю об'єму.

#### ***IV Температуропровідність матеріалу***

Температуропровідність матеріалу визначається як:

$$D_T \equiv k / (\rho \cdot C_p)$$

де –  $k$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\rho$  - густина,  $C_p$  - питома теплоємність при постійному тиску. Температуропровідність та її визначальні параметри теплопровідність та теплоємність одиниці об'єму ( $\equiv \rho \cdot C_p$ ) є ключовими параметрами при проектуванні термоізоляційних систем.

Припустимо є піч, яка повинна багаторазово нагріватися та охолоджуватися. Якщо товщина стінки печі оптимізована для мінімізації втрат енергії, то кількість теплоти, що проходить через одиницю площі стінки печі за один цикл нагріву-охолодження може бути записана як:

$$Q = \frac{k}{\sqrt{D_T}} \Delta T \sqrt{2t} = \sqrt{2t \cdot k \cdot \rho \cdot C_p} \cdot \Delta T$$

де  $\Delta T$  - різниця температур між внутрішнім об'ємом та зовнішнім простором печі;  $t$  – час роботи печі. Виготовлення стінок з матеріалів з низькою теплопровідністю та низькою теплоємністю одиниці об'єму дозволяє зменшити теплові втрати на робочий цикл печі.

а) Використовуючи базу даних Level 3 згенеруйте log-log графік коефіцієнта теплопровідності  $k$  від  $\rho \cdot C_p$ ;

б) Для печі з  $\Delta T = 60^\circ$  та  $t = 8$  годин, розмістіть лінію на графіку (а), для вибору матеріалів стінки, що забезпечать теплові втрати не вище  $6.4 \text{ МДж/м}^2$ . Скільки матеріалів задовільняє цьому критерію? Ідентифікуйте та позначте п'ять матеріалів з різних категорій;

в) Використайте інструмент limit для визначення кількості матеріалів в групах пунк (б) будуть відповідати наступним обмеженням. Для кожного обмеження, перерахуйте три приклади, що не були включені на попередній етапах.

i) "Acceptable" або "Excellent" стійкість по відношенню до слабких кислот, слабких лугів та органічних розчинників;

ii) частина i), а також: можуть бути використані до температури  $250^\circ$ . Які з полімерів можна використати?;



iii) частина ii), а також мають втілену енергію первинного виробництва (embodied energy of primary production) не вище 80 МДж/кг.

### ***V Опір термічному удару (1)***

Опір матеріалу термічному удару визначається за співвідношенням:

$$TSR = \frac{k \cdot \sigma_f}{\alpha \cdot E}$$

де  $k$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\sigma_f$  - межа міцності на розрив,  $\alpha$  - коефіцієнт лінійного термічного розширення,  $E$  - модуль пружності матеріалу. Параметр  $TSR$  показує здатність матеріалу витримувати великі, раптові зміни температури без деформування та/або руйнування.

а) Використовуючи базу даних Level 2 згенеруйте log-log графік залежності  $\sigma_f/E$  від  $k/\alpha$ . Ввімкніть відображення контейнерів категорій та підпишіть їх. Проведіть лінію, що відповідає рівним значенням  $TSR$ .

б) Хоч полімери мають відносно низьке значення  $TSR$ , опір термічному удару для них не є лімітуючою властивістю полімерів, як це є для кераміки. Чому?

в) Використовуючи базу даних Level 3 створіть графік залежності  $\sigma_f/E$  від  $k/\alpha$  для сімейства матеріалів "кераміка та скло" (ceramics and glasses). Нанесіть лінії, що відповідають рівним значенням  $TSR$ . Дайте відповіді на наступні запитання стосовно одержаного графіка.

i) "Silica (fused)" плавлений кварц - (скловидний  $\text{SiO}_2$ ) та "glass ceramic 9608" (скло, що шляхом термообробки перетворене до майже кристалічного стану, оксид літію-алюмінію-кремнію з низьким коефіцієнтом термічного розширення) мають близькі значення  $TSR$ . Що є найбільш значимим у відмінностях величин  $\sigma_f$ ,  $E$ ,  $k$  та  $\alpha$  між цими матеріалами? Чи можна якусь з цих відмінностей описати в термінах їх структури?

ii) "Glass ceramic (ZD)" має  $TSR$ , значно вище ніж у плавленого кварцу, хоча обидва складаються практично з чистого оксиду кремнію. Що є найбільш значимим у відмінностях величин та між цими матеріалами? Чи можна якусь з цих відмінностей описати в термінах їх структури?

## ***VI Опір термічному удару (2)***

Рівняння опору матеріалу термічному удару містить модуль пружності  $E$  та коефіцієнт лінійного термічного розширення  $\alpha_L$ . Визначимо  $E \cdot \alpha_L$  як параметр термічного удару  $TSR$ .

а) На log-log графіку залежності  $\alpha_L$  від  $E$  активувати контейнери сімейств матеріалів та позначити їх. Додайте лінію вибору, що відповідає рівним значенням величини  $E \cdot \alpha_L$  та обґрунтуйте вибір коефіцієнту нахилу такої лінії.

б) Графік частини а) показує, що жорсткі матеріали звичайно демонструють низькі значення термічного розширення. Поясніть таку поведінку в термінах залежності величин обох властивостей від міжатомних зв'язків.

в) Які дві категорії матеріалів мають найвище значення параметра  $TSR$ ? Які матеріали мають найнижчі значення цього параметра.

г) Проранжуйте наступні матеріали в кожній категорії від найвищого до найнижчого значення  $TSR$ . Визначіть для кожної категорії, що має більший вплив: низький модуль  $E$ , низький коефіцієнт термічного розширення  $\alpha_L$ , чи обидва.

i) Кераміка: нітрид кремнію, оксид алюмінію, кварцеве скло, цегла

ii) Метали: магнієві сплави, алюмінієві сплави, титанові сплави, сталі

iii) Полімери: полікарбонат, РЕЕК, поліпропілен, політетрафторетилен.

## ***VII Магнітні матеріали***

Використовуючи базу даних Level 3, та спосіб звуження вибору "Select from" - "Magnetic materials", а також одиниці вимірювання "SI (Consistent)":

а) Згенеруйте log-log графік залежності залишкової магнітної індукції (remanent induction) ( $B_r$ ) від коерцитивної сили ( $H_C$ ). Виділіть матеріали, які є магнітно-м'якими та магнітно-твердими. Вкажіть найм'якший (магнітно) з магнітно-твердих та найтвердіший (магнітно) з магнітном'яких та їх значення коерцитивної сили.

б) Використовуючи інструмент Limit до результатів графіка п. а) визначте: який з магнітно-м'яких та який з магнітно-твердих матеріалів мають найбільшу залишкову індукцію разом з температурою Кюрі вище  $500^\circ\text{C}$ . Запишіть два матеріали та відповідні їх значення  $T_C$  та  $B_r$ .

в) Дві революційно нові категорії магнітно-м'яких матеріалів дозволяють створювати високоякісні мініатюризовані навушники. Це можливо завдяки їх

безпрецедентно високим значенням магнітної енергії на одиницю маси - максимум енергії  $(B \cdot H_{max}, \text{Дж/м}^3)$ , розділений на густину  $(\text{кг/м}^3)$ . Згенеруйте log-log графік залежності від густини. Використайте лінію вибору з нахилом 1 та ідентифікуйте (за 2-3 основними елементами в їх складі) дві згадані категорії матеріалів та позначте їх на графіку. Яка з цих категорій має вищу магнітну енергію на одиницю маси? Яка з них має вищу температуру Кюрі?

### ***VII Конфлікт питомої міцності та тріщиностійкості***

5. Для виготовлення відповідального виробу необхідно обрати матеріал з високою питомою міцністю та високою тріщиностійкістю.

а) для класу матеріалів Алюмінієві сплави (обрано інструментом Tree) побудувати графік зв'язку питомої міцності (питома межа плинності) та тріщиностійкості.

б) вертикальною лінією вибору вилучити з розгляду усі матеріали, для яких значення питомої міцності менше  $0,1 \text{ МПа}/(\text{кг/м}^3)$  ( $10^5 \text{ Н*м/кг}$ )

в) перевести зображення в режим Автомасштабування і відображення тільки середніх значень відповідних величин

г) визначити множину Парето, та позначити матеріали, що її формують.

д) скласти таблицю значень для обраних матеріалів

е) оцінити приблизне значення обмінного коефіцієнта (використовується для побудови штрафної функції) для даної задачі в крайніх областях множини Парето.

є) виконати вимоги п.п. а)-е) для сталей, об'єднавши класи леговані сталі та вуглецеві сталі

ж) порівняти результати в таблицях 1 та 2 і зробити висновки.

## **Комп'ютерний практикум 4.**

### **Вплив технологічних процесів**

**Мета практикуму:** Практично засвоїти принципи оптимального вибору технологічних процесів за допомогою системи CES Edupack

Виробництво матеріалів та виробів з них нероздільне з відповідним технологічним процесом, що має вигляд ланцюжка технологічних операцій. Таблиця бази даних технологічних процесів (Process Universe), коротко описана в розділі 1. є лише одним з проявів процесів у базі даних CES та в стратегії вибору матеріалу (та технології) засобами пакету. Процеси виробництва формують три основних зв'язки: зв'язок технологічного процесу з заданою формою виробу, вплив технологічного процесу на окремі властивості матеріалів, вплив технологічного процесу на вартість матеріалів та виробів. Кожен з вказаних зв'язків необхідно розглянути окремо.

#### **4.1 Вибір технологічних процесів за видом матеріалу та формою виробу**

Однією з важливих особливостей CES Edupack є підтримання сумісності в трикутнику матеріал - форма - процес. Очевидно, що вибір матеріалу без врахування такої сумісності є досить сумнівним, і в багатьох випадках - взагалі не має сенсу. Зрозуміло, що для більшості металів та сплавів основними технологіями створення форми є лиття або механічне формування, яке може бути розділене на формування порошкової суміші з наступним спіканням (традиційна технологія порошкової металургії) або формування, в нагрітому чи холодному стані, попередньо одержаної заготовки (кування, штампування тощо). Вироби з кераміки можна одержувати тими ж методами порошкової металургії, але не можливо куванням. Список прикладів можна розширювати достатньо довго.

При роботі в середовищі CES Edupack сумісність матеріал - форма - процес реалізується шляхом застосування інструменту Tree. Так, наприклад, виконуючи вибір на основі множини Метали (база даних Level 3), початковий список включає 1816 матеріалів. Якщо за допомогою інструмента Tree обрати таблицю Shape, і у ній підмножину Sheet (у вигляді листа), список скоротиться до 1516 матеріалів, а вибір способу одержання форми: ProcessUniverse - Shaping - Casting (одержання литвом) залишить для розгляду всього 575 матеріалів.

Застосування схем відбору матеріалів, як у прикладі, наведеному вище вимагає від користувача достатньої обережності та кваліфікації. По-перше фільтри інструментом Tree необхідно накладати поступово, по одному. Логіка програми вважає: якщо в одній процедурі (stage) накладено декілька фільтрів, то сумарна множина вибору формується як об'єднання множин визначених окремими фільтрами. Якщо фільтри накладено окремими процедурами (stage), то результуюча множина вибору формується як перетин множин, визначених окремими фільтрами.

З іншого боку, про що свідчить і наведений приклад, система не завжди відслідковує змістовну сумісність фільтрів, адже одержання листових виробів литтям не може вважатися звичним підходом. Якщо провести вибір на таблиці: ProcessUniverse: Shaping processe, і застосувати інструмент Tree спочатку виділивши ливарні методи (Casting), а потім листову форму (Sheet), то результуюча множина процесів виявиться порожньою.

Таким чином, забезпечення сумісності в трикутнику матеріал - форма – процес є комплексним завданням, в якому експертна система CES застосовується переважно для швидкого доступу до інформації та накладання фільтрів фахівцем – експертом предметної галузі. Інформацію початкового рівня, що покликана допомогти фахівцю у виборі класу технологічних процесів первинного формоутворення виробів розміщено в системі допомоги у вигляді матриці сумісності (таблиця 4.1)<sup>7</sup>. Однак, інформація, наведена в таблиці досить обмежена і відіграє допоміжну роль.

Іншими шляхами забезпечення сумісності матеріалів та технологічних процесів є залучення додаткової інформації, яку можна одержати з баз даних системи CES.

Так, інформації картки матеріалів містять таблицю придатності відповідного матеріалу до застосування класу технологічних процесів – Processing properties (рис. 4.1). З іншого боку, інформаційні картки технологічних процесів містять неструктуровану інформацію про матеріали, до яких може бути застосовано процес. Така інформація міститься у розділі Supporting information, пунктах Technical notes та Typical uses.

Безвідносно до класу матеріалу, при виборі технологічного процесу можуть бути застосовані фільтри:

---

<sup>7</sup> За матеріалами Michael Ashby, Hugh Shercliff, David Cebon. Materials. Engineering, Science, Processing and Design. Elsevier; 2007. - 514 p.

- Форма: Призматична обертання, Призматична, Листова, Листова фасонна, 3-вимірنا суцільна, 3-вимірна з порожниною;
- Фізичні атрибути: Граничні заметри маси, Граничні значення поперечного перетину, Точність, Шорсткість одержаної поверхні, Допустимі швидкості різання, Мінімальна товщина стружки;
- Загальні характеристики процесу: Належність до видів первинного чи вторинного формоутворення, Неперервність чи дискретність процесу;
- Економічні атрибути: Економічно вигідні розміри партії, Відносна еквівалентна вартість, Відносна вартість обробки, Інтенсивність праці;
- Параметри моделювання вартості.

Таблиця 4.1 Матриця сумісності класів процесів первинного формоутворення та класів матеріалів

	Чорні метали	Кольорові метали	Кераміка	Скло	Еластомери	Термо-пласти	Термосети	Полімерна піна	Композити
Лиття в піщану форму	✓	✓							
Лиття під тиском		✓							
Лиття за витоплюваними моделями	✓	✓							
Лиття під низьким тиском		✓							
Кування	✓	✓							
Екструзія		✓							
Формування з листа	✓	✓							
Порошкові методи	✓	✓	✓						
Електрообробка	✓	✓	✓						
Традиційна механічна обробка	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Інжекційне формування				✓	✓	✓	✓	✓	
Ударне формування				✓		✓			
Компресійне формування				✓	✓	✓	✓		
Відцентрове формування					✓	✓	✓	✓	
Термоформування					✓	✓	✓		
Лиття полімерів					✓	✓	✓	✓	
Намотка-просочення									✓
Пошарове формування									✓
Вакуумне формування									✓

## 4.2 Вплив технології виробництва на властивості матеріалів

Важлива особливість графіків властивостей матеріалів це те, що форма знаків (еліпсів), що відображають матеріал, може допомогти зробити висновок відносно міри і шляхів досягнення вищих показників властивостей. На рисунку 4.2 показано графік в координатах межа плинності, МПа – модуль пружності, ГПа в логарифмічних координатах. Видовженість знаків по горизонталі показує, що міцність металів і сплавів (межа плинності) на відміну від модуля пружності суттєво залежить від структури матеріалу, а значить визначається технологічним процесом одержання матеріалу та технологічними варіаціями хімічного складу.

Processing properties			
Metal casting			Unsuitable
Metal cold forming			Acceptable
Metal hot forming			Acceptable
Metal press forming			Acceptable
Metal deep drawing			Unsuitable
Machinability - speed	24,4	- 30,5	m/min
Weldability - MIG			Excellent
Weldability - plasma			Excellent
Weldability - SAW			Excellent
Weldability - TIG			Excellent
Brazeability			Fair
Carbon equivalency	5,7	- 6,47	

Рисунок 4.1 Приклад інформації про оброблюваність матеріалу (в даному випадку з інформаційної картки нержавіючої сталі аустенітного класу)

Міцність є однією з найбільш досліджених характеристик металів та сплавів. В таблиці 4.2 показано застосування основних механізмів зміцнення: зміцнення твердими розчинами, дисперсне зміцнення та деформаційне зміцнення до основних типів конструкційних матеріалів<sup>8</sup>, що дозволяє досягати необхідних рівнів міцності та тріщиностійкості.

<sup>8</sup> За матеріалами Michael Ashby. Materials Selection in Mechanical Design. Elsevier; 2011. - 646 p.

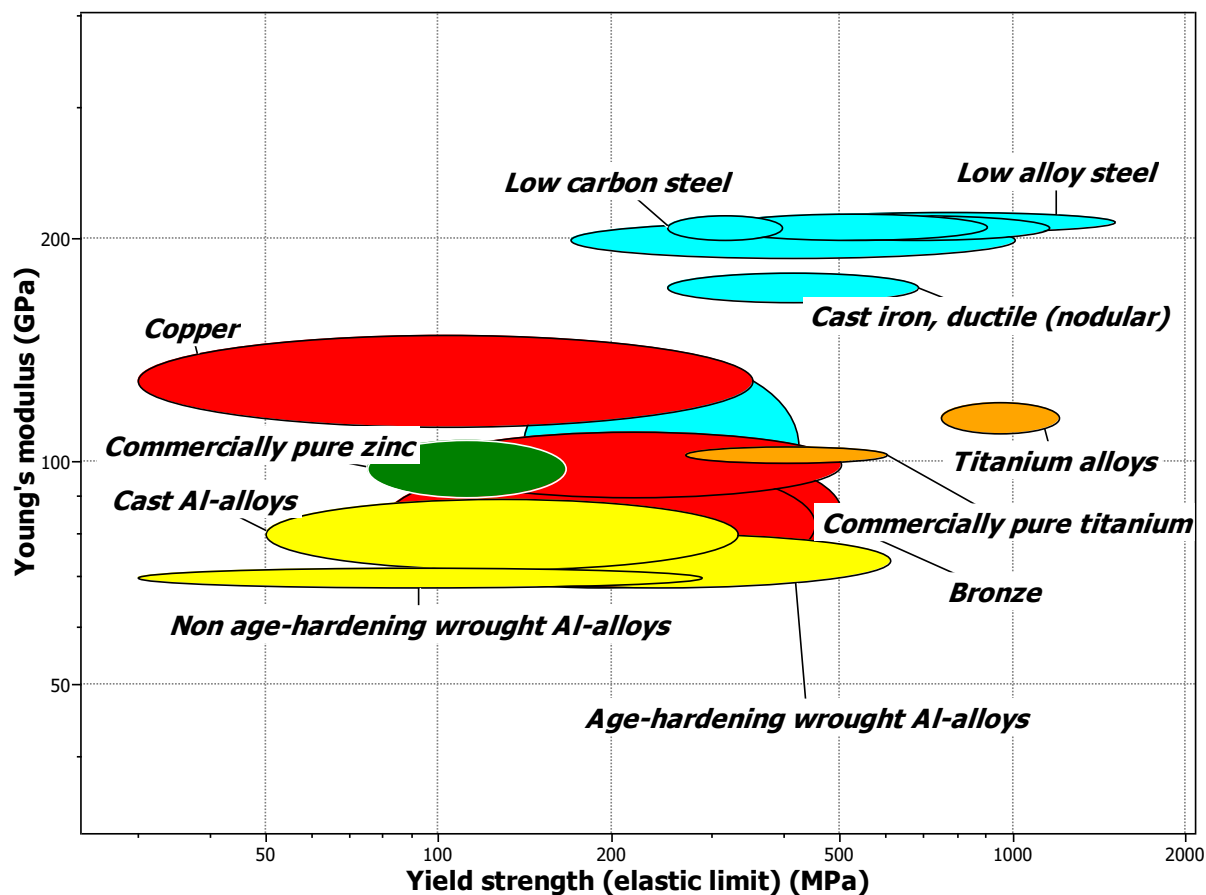


Рис. 4.2 Діаграма властостей металів та сплавів в координатах межа плинності – модуль пружності.

Таблиця 4.2.

Сплав	Типове застосування	Зміцнення твердими розчинами	Дисперсне зміцнення	Деформаційне зміцнення
Алюміній, Al	Харчова фольга			✓✓✓
Мідь, Cu	Дріт			✓✓✓
Алюміній, магній в литому стані	Автомобільні деталі	✓✓✓	✓	
Бронза (Cu-Sn), Латунь (Cu-Zn)	Деталі для морського застосування	✓✓✓	✓	✓
Деформівні Al сплави без термооброблення	Суднобудування, будівництво	✓✓✓		✓✓✓
Термооброблені деформівні Al сплави	Авіабудування, будівництво	✓	✓✓✓	✓
Низьковуглецеві сталі	Автомобіле-, суднобудування, будівництво	✓✓✓		✓✓✓
Низьколеговані сталі	Автомобільні деталі, інструмент	✓	✓✓✓	✓
Нержавіючі сталі	Резервуари, реактори	✓✓✓	✓	✓✓✓
Литі Ni сплави	Авіаційні двигуни	✓✓✓	✓✓✓	



Більшість способів зміцнення металів та сплавів, які застосовуються призводять до зміни однієї з важливих міцнісних характеристик (зазвичай межі плинності) за рахунок іншої важливої характеристики - тріщиностійкості. На рис. 4.3<sup>9</sup> показано вплив різних технологічних прийомів на зміну двох вказаних характеристик матеріалу. Підвищення межі плинності більш ніж у 10 разів супроводжується зменшенням тріщиностійкості на 5-60 % залежно від обраного способу зміцнення. Схожу ситуацію можна спостерігати для сплавів міді, сталей та інших. Усе це необхідно враховувати при виборі матеріалу для відомих умов експлуатації.

### 4.3 Моделі вартості процесів

При виборі технологічних процесів, основним критерієм оптимальності є вартість виготовлення виробів. Це принципово відрізняє вибір процесів від вибору матеріалів, коли можуть розглядатися достатньо різноманітні критерії оптимальності.

Оскільки вартість виробництва є основним критерієм, система CES містить спеціальний механізм – підсистему моделювання вартості виготовлення виробів за обраном технологічним процесом.

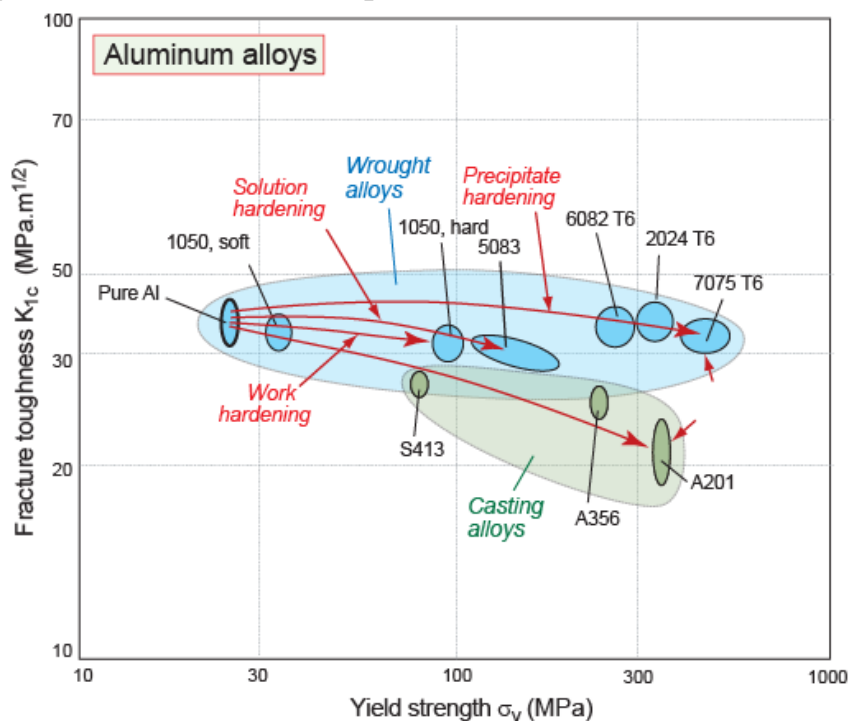


Рис. 4.3 Вплив різних механізмів зміцнення на межу плинності та тріщиностійкість сплавів на основі алюмінію

<sup>9</sup> David R.H. Jones, Michael F. Ashby. Engineering materials 1. An Introduction to Properties, Applications and Design. Elsevier. - 2019. – 564 p.

Загальна інформація про вартість процесу доступна на інформаційній сторінці процесу, в розділі Cost Modeling, як показано на рисунку 4.4.

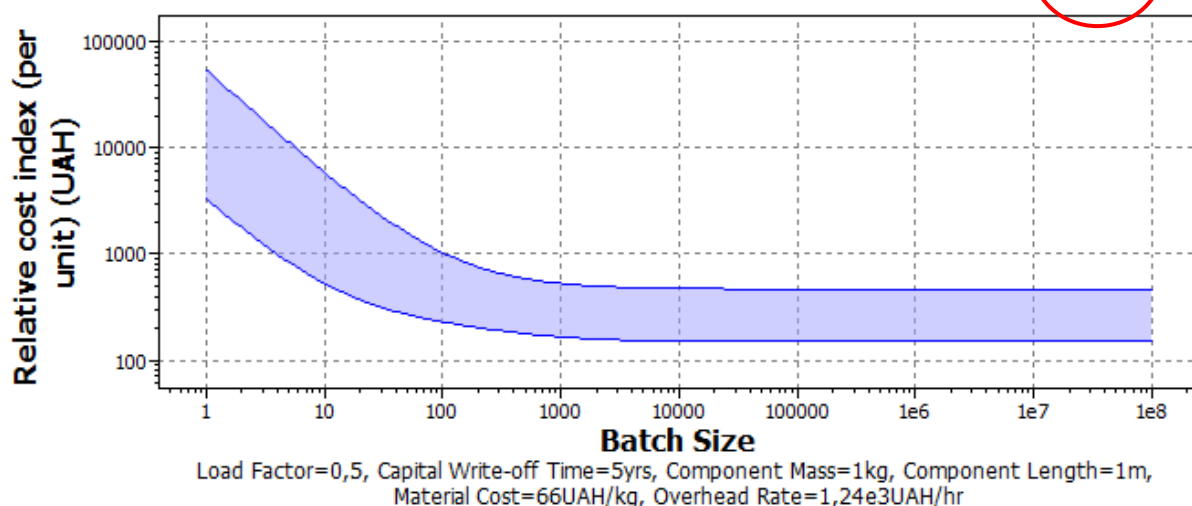
Інформація Cost Modeling включає графік залежності індекса відносної вартості одиниці продукції від розміру серії. Окремо наведено характерну для процесу інформацію: капітальні витрати, відсоток використання матеріалу, швидкість виробництва, ресурс і вартість інструменту. Графік відображає узагальнену інформацію. Більш точне моделювання вартості може бути активоване через виклик функції – позначена кнопка в правому верхньому кутку. Вікно налаштування моделі показано на рис. 4.5. У вікні налаштування можна явно вказати значення основних параметрів моделі, що властиві конкретному проекту і впливають на показник, обчислений за моделлю. Назви параметрів та їх українські відповідники розміщено в таблиці 4.3.

### Cost modeling

Relative cost index (per unit)

165 - 529 UAH

Parameters: Material Cost = 66UAH/kg, Component Mass = 1kg, Batch Size = 1e3, Overhead Rate = 1,24e3UAH/hr, Capital Write-off Time = 5yrs,



Capital cost	6,22e5	-	2,49e6	UAH
Material utilization fraction	0,9	-	0,99	
Production rate (units)	5	-	200	/hr
Tool life (units)	100	-	1e3	
Tooling cost	3,11e3	-	5,45e4	UAH

Рис. 4.4 Розділ Cost Modeling інформаційної сторінки процесу ізостатичного пресування.

Інформація Cost Modeling включає графік залежності індекса відносної вартості одиниці продукції від розміру серії. Окремо наведено характерну для процесу інформацію: капітальні витрати, відсоток використання матеріалу, швидкість виробництва, ресурс і вартість інструменту. Графік відображає

узагальнену інформацію. Більш точне моделювання вартості може бути активоване через виклик функції – позначена кнопка в правому верхньому кутку. Вікно налаштування моделі показано на рис. 4.5. У вікні налаштування можна явно вказати значення основних параметрів моделі, що властиві конкретному проекту і впливають на показник, обчислений за моделлю. Назви параметрів та їх українські відповідники розміщено в таблиці 4.3.

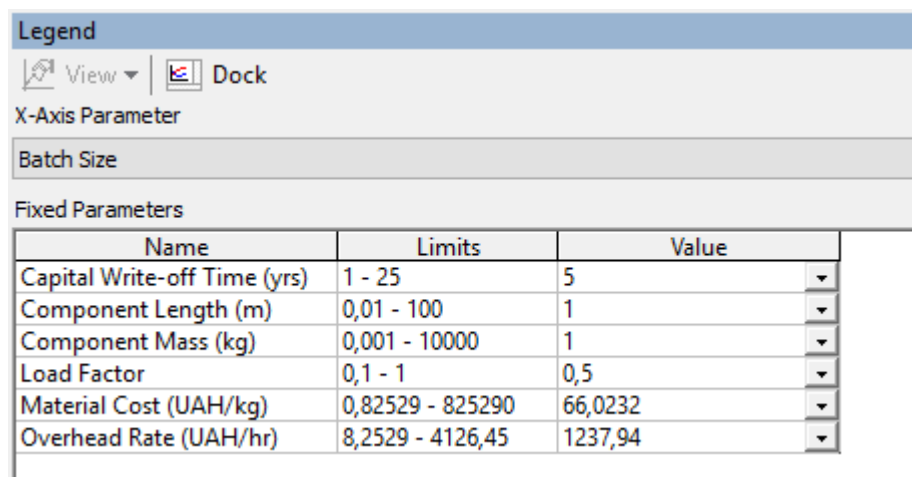


Рис. 4.5 Параметри налагоджування моделі.

Таблиця 4.3.

Назва параметра	Український відповідник
Batch Size	Розмір партії (шт.)
Capital Write-off Time (yrs)	Термін амортизації (років)
Component Length (m)	Характерний розмір виробу (м)
Component Mass (kg)	Маса виробу (кг)
Load Factor	Коефіцієнт завантаження обладнання
Material Cost (UAH/kg)	Вартість матеріалів (Грн/кг)
Overhead Rate (UAH/hr)	Норма накладних витрат (Грн/година)

Один з параметрів моделі обирається як показник для горизонтальної осі, для інших можуть бути задані значення.

### Контрольні запитання

1. Який механізм впливу технологічного процесу на властивості матеріалу, за одного й того ж хімічного складу?
2. Чому, на вашу думку, в базі технологічних процесів CES відсутні моделі вартості процесів механічної обробки?
3. Який основний фактор впливає на високу вартість виробів, одержаних процесами порошкової металургії при незначному розмірі партії?
4. Чому, на Вашу думку, вартість виробів, одержаних адитивними технологічними процесами практично не залежить від розміру партії?

## Практичні завдання

1. Наступна таблиця містить типові дані для міцності та тріщиностійкості мідних сплавів (литих та деформівних).

Сплав	Процес	Основний механізм зміцнення	Межа плинності, МПа	Тріщиностійкість, МПа*м <sup>1/2</sup>
Чиста мідь	Лиття	Немає	35	105
Чиста мідь	Гаряча прокатка	Робота	80	82
Бронза (10% Sn)	Лиття	Твердий розчин	200	55
Латунь (30% Zn)	Лиття	Твердий розчин	90	80
Латунь (40% Zn)	Лиття	Твердий розчин	245	48
Латунь (30% Zn)	Деформована +відпалена	Твердий розчин	100	75
Латунь (30% Zn)	Деформована	Твердий розчин + робота	400	35
Латунь (40% Zn)	Холодно-деформована	Твердий розчин + робота	380	38
Cu-2% Be	Деформована +термооброблена	Дисперсне зміцнення	1000	17

За графіком властивостей в log-log (може бути побудований будь-яким доступним способом) дайте відповіді на наступні запитання:

- Як литі та деформівні мідні сплави відрізняються за тріщиностійкістю за близьких значень міцності?
- Проранжуйте механізм зміцнення (за таблицею) в порядку ефективності їх застосування.
- Чи тенденції, що спостерігаються в п.(а, б) співпадають з зображеними на рис. 4.3 для алюмінієвих сплавів.

2. Використайте базу даних Level 3 для дослідження властивостей Cu-Ni сплавів. Виберіть дані для таких характеристик: модуль пружності, межа плинності, тріщиностійкість, питомий електроопір для чистих, відпалених Cu та Ni та відібраних сплавів між ними (10, 30, 70 % Ni). (Врахуйте, що в CES можна використовувати вміст одного з компонентів у складі матеріалу в якості величини за однією з осей)

а) які з властивостей демонструють залежність близьку до лінійної від складу в сплавах системи Cu-Ni?

б) сплави, показані на графіку не є бінарними. На які властивості мають сильний вплив інші елементи?

3. Використайте CES Level3 для побудови графіку зв'язку міцності та тріщиностійкості магнію та його сплавів. Які відмінності спостерігаються між литими та деформівними сплавами.

4. Записи для полімерів в CES містять вміст наповнювача (%) як параметр. Побудуйте графік кожної з заданих властивостей від вмісту наповнювача для полімерів PA, PP та епоху, та визначте: наскільки ефективно наповнювач змінює модуль пружності, міцність цих полімерів. Як вони впливають на тріщиностійкість та вартість 1 кг матеріалу.

5. Використовуючи інструмент Limit застосований до бази даних процесів обробки поверхні (Surface treatment) знайдіть процеси які збільшують стійкість до втоми. Занотуйте та порівняйте результати з бази даних процесів Level 2 та Level 3. Знайдіть (інформація CES та незалежних джерел) та занотуйте розширену характеристику по 2 процеси з кожної бази.

6. Використовуючи інструмент Limit застосований до бази даних процесів обробки поверхні (Surface treatment) знайдіть процеси які збільшують зносостійкість. Занотуйте та порівняйте результати з бази даних процесів Level 2 та Level 3. Знайдіть (інформація CES та незалежних джерел) та занотуйте розширену характеристику по 2 процеси з кожної бази. Порівняйте високоенергетичні (laser based, plasma based) методи та методи пов'язані з дифузійними покриттями.

7. Необхідно обрати технологічний процес для виробництва поршня з алюмінієвого сплаву. Маса виробу складає 0.8 – 1.0 кг, мінімальна товщина стінки 4 – 6 мм. За вимогами проекту точність має бути не гірше 0.5 мм, а шорсткість поверхні відповідати класу 2 – 5 мкм. Очікується, що розмір партії складе 1000 штук. Використайте графік атрибутів процесів для визначення список технологічних процесів, які відповідають таким вимогам. Чи зміниться вибір процесу, якщо розмір партії збільшити до 10000 шт.

8. Використовуючи базу даних CES Level 3 для вибору ливарного процесу для описаних нижче виробів. Обов'язково перевірте: - сумісність процесу з матеріалом, формою та розміром виробу. Визначте (знайдіть у тому числі в зовнішніх джерелах) відповідну інформацію стосовно точності, шорсткості поверхні та економічно обґрунтованого розміру серії.

- а) великі чавунні водопровідні труби;
- б) 10 000 іграшкових автомобілів довжиною 60 мм з цинкового сплаву;
- в) дрібні турбінні лопатки газотурбінного двигуна з Ni-Co суперсплаву MAR-M432 (необхідні максимально можливі точність та якість поверхні)
- г) великий гребний гвинт з латуні.

9. Використовуючи базу даних CES Level 3 і модель розрахунку вартості виготовлення виробів за обраними технологічними процесами

- порівняти виробництво осесиметричних пустотілих деталей з характерним лінійним розміром 50 – 80 мм і масою 0.12-0.15 кг з нержавіючої сталі. В якості матеріалу обрати нержавіючу сталь аустенітного класу ASTM CB-30. Для порівняння обрати технологічні процеси: лиття під тиском, лиття за газифікованими моделями, пресування та спікання порошків, селективне лазерне оплавлення. Оцінити залежність економічних показників кожного з процесів від розміру партії;

- провести порівняння тих же процесів, враховуючи, що вартість матеріалу в порошковому стані для традиційних методів порошкової металургії складає  $3 \cdot C_m$ , а для адитивних методів –  $8 \cdot C_m$ . (Коефіцієнти обрано наближено).

Для обох варіантів графіки залежності середньої вартості від розміру партії звести в одні координати. Пояснити власними словами причину розбіжності характеру залежності.

## **Комп'ютерний практикум 5.**

### **Оптимізація екологічної складової матеріалів та процесів**

**Мета практикуму:** Вивчити та практично засвоїти принципи оцінки екологічно впливу виробництва та використання матеріалів засобами CES Edupack

Продукування матеріалів та виробів з них пов'язане з постійним споживанням сировинних ресурсів, які не є невичерпними. З іншого боку, виробництво та використання матеріалів призводить до створення значної кількості відходів. Ріст використання вичерпних ресурсів як і накопичення відходів протирічить сучасним поглядам стосовно сталого розвитку суспільства.

#### **5.1 Життєвий цикл матеріалів і оцінка екологічного впливу**

На рисунку 5.1<sup>10</sup> показано схему життєвого циклу матеріалів. Виробна сировина переробляється для отримання матеріалів; матеріали переробляють в продукти, товари; продукти використовуються а після використання утилізуються. Частина відходів при утилізації продуктів повертається в життєвий цикл, інша потребує знищення – спалювання, захоронення, тощо. Енергія та матеріали споживаються в кожній точці (фазі) цього циклу з відповідним показником викидів CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, тепла, а також газоподібних, рідких та твердих відходів, які спільно називають екологічними «стресорами». Точний LCA (Life cycle analysis) дозволяє визначити та узагальнити усі впливи виробництва та використання заданого типу матеріалів чи продуктів на навколишнє середовище на основі статистичної обробки повних життєвих циклів. Іншими словами LCA дозволяє одержати порівняно точні значення впливів матеріалів які уже виробляються і експлуатуються і недоступний при створенні нових матеріалів. Крім того повний LCA є достатньо дорогою процедурою. Тому розробляються наближені методи LCA, що мають на меті поєднання прийнятної вартості з достатньою точністю для прийняття рішення про вибір матеріалу.

---

<sup>10</sup> За матеріалами Michael F. Ashby. Materials and Sustainable Devepment. Elsevier. - 2016. – 312 p.



Рисунок 5.1 Схема життєвого циклу матеріалів.

Спрощення процедури LCA базується на введенні екоіндикаторів – чисельних показників, що об’єднують основні види екологічних впливів. Система CES Edupack застосовує в якості екоіндикаторів наступні показники: втілена енергія  $H_m$ , виділення CO<sub>2</sub> та витрати води. Втілена енергія матеріалу – це енергія, яку потрібно виділити для створення 1 кг корисного матеріалу. Втілена енергія вимірюється і розміщується в таблицях в МДж/кг (MJ/kg). Виділення CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> footprints) – є очікувана кількість двоокису карбону або еквівалентна кількість інших оксидів, що вижділяється в атмосферу від виробництва 1 кг матеріалу, вимірюється в кг/кг.

Втілену енергію, в першому наближенні, можна оцінити термодинамічно – наприклад оцінити кількість енергії, необхідну, щоби відновити Al з його оксиду. Але це тільки початок. Визначена таким способом енергія складає від 10 до 50% втіленої енергії.

Екоіндикатори розміщені в інформаційних картках матеріалів у трьох підрозділах: Первинного виробництва (Primary production), Оброблення (Processing) та Утилізації (Recycling and end of life). На рис. 5.2 показано частину інформаційної картки бронзи. Підрозділ Processing містить екологічну інформацію для тих технологічних процесів, які є поширеними для даного матеріалу – наприклад стосовно бронзи вказано лиття, грубого та тонкого механічного оброблення, тощо.



<b>Primary production energy, CO2 and water</b>			
Embodied energy, primary production	* 57,4	- 63,3	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 3,64	- 4,01	kg/kg
Water usage	* 500	- 553	l/kg
<b>Processing energy, CO2 footprint &amp; water</b>			
Casting energy	* 8,64	- 9,55	MJ/kg
Casting CO2	* 0,648	- 0,716	kg/kg
Casting water	* 16,4	- 24,5	l/kg
Vaporization energy	* 9,17e3	- 1,01e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 688	- 760	kg/kg
Vaporization water	* 3,82e3	- 5,73e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0,581	- 0,642	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,0436	- 0,0482	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 1,54	- 1,7	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,115	- 0,127	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 2,6	- 2,87	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0,195	- 0,215	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 91,7	- 101	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	* 6,88	- 7,6	kg/kg
<b>Recycling and end of life</b>			
Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	* 13	- 14,4	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1,02	- 1,13	kg/kg
Recycle fraction in current supply	40,8	- 45	%
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✗		
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		

Рисунок 5.2 Значення екоіндикаторів латуні CuZn10Pb3Sn2

Наявність екоіндикаторів у базі даних дозволяє отримати графік, що пов'язує втілену енергію первинного виробництва та ціну 1 кг матеріалу. З незначними відхиленнями, точки металів розташовуються вздовж прямої лінії, що свідчить, про тісний зв'язок цих показників.

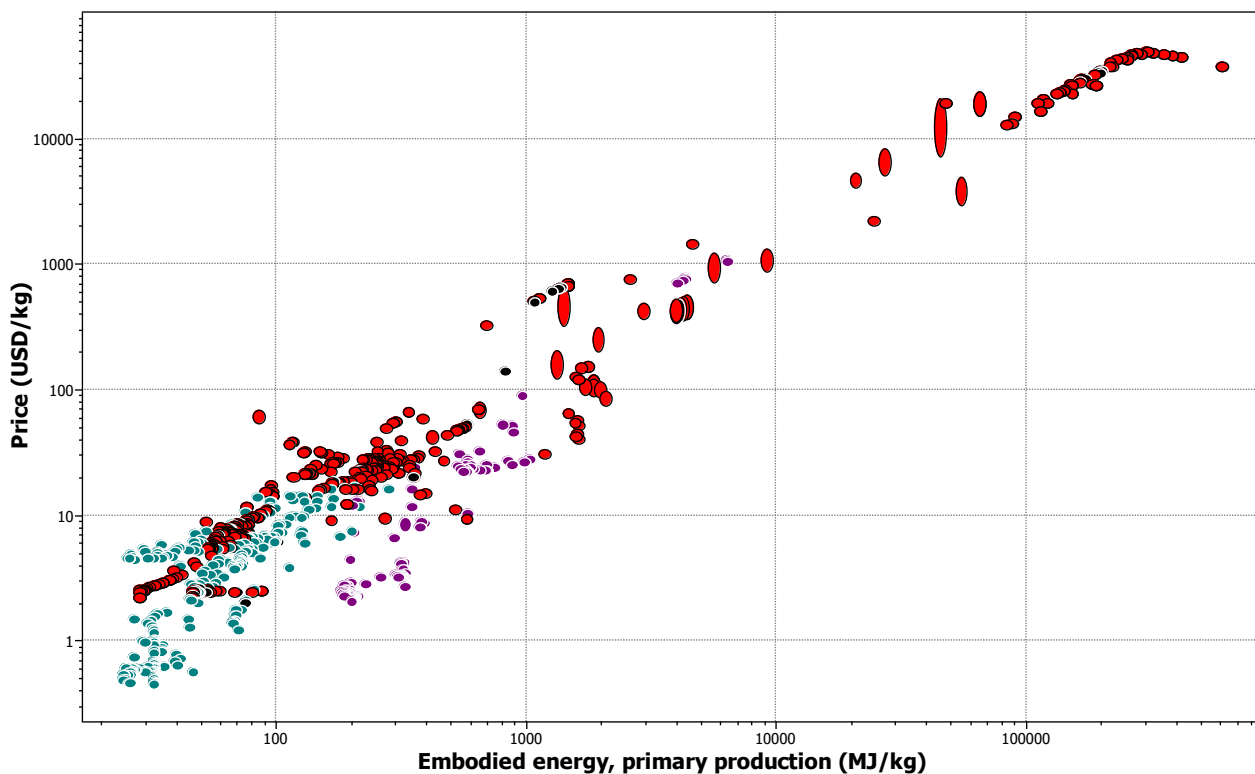


Рисунок 5.3 Зв'язок втіленої енергії первинного виробництва та ціни для сукупності металів в базі даних CES

## 5.2 Засоби екоаудиту

Разом з набором «пасивної» інформації, що міститься в таблицях баз даних, система CES має «активний» процесор екоаудиту, який активується натисканням відповідної кнопки на панелі інструментів. Загальна схема інформаційних потоків при проведенні екоаудиту показана на рис. 5.4.

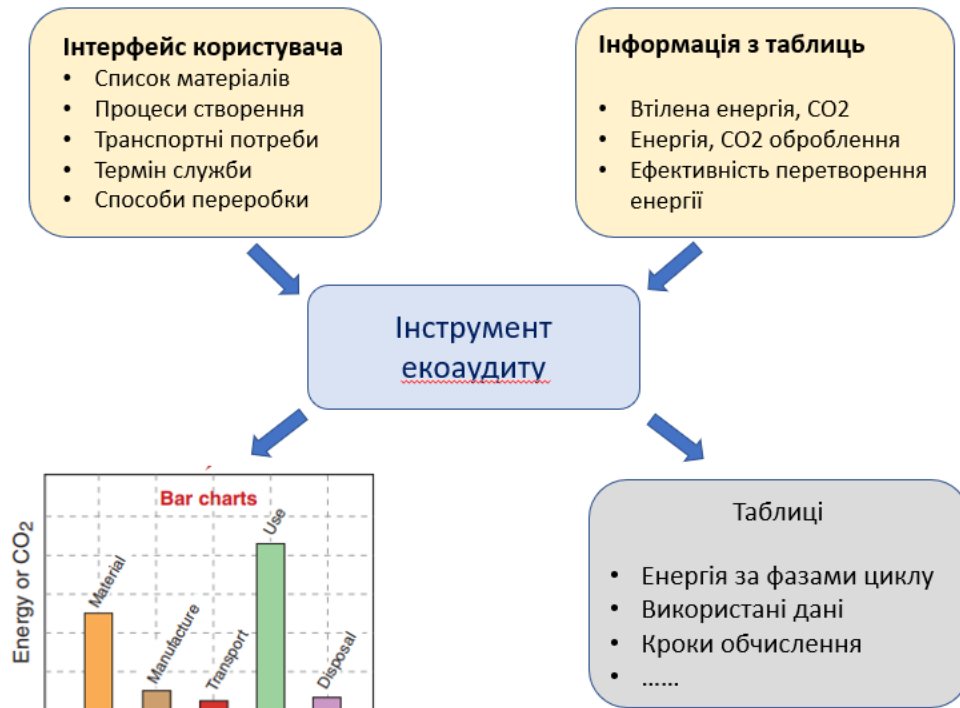


Рисунок 5.4 Схема проведення екоаудиту

Для проведення обмеженого екоаудиту засобами CES Edupack необхідно активувати відповідний програмний механізм – обрати кнопку Eco Audit на панелі інструментів або обрати пункт Tools – Eco Audit. Система відкриває систему вкладок, показану на рис. 5.5. Вкладка Product definition містить декілька груп полів вводу інформації:

- Product information – загальна інформація про продукт, для якого проводиться екоаудит;
- Material, manufacture and end of life – докладна інформація про усі компоненти продукту – матеріали, технологічні процеси виготовлення, способи утилізації. Інформація для кожного компонента складного виробу записується окремим рядком;
- Transport - засоби транспортування виробів;

- Use – спосіб та термін використання, окремо вказується показники споживання енергії, для оцінки екологічності відповідного етапу життєвого циклу.

Рисунок 5.5 Форма підготовки даних для екоаудиту

Розглянемо роботу інструменту екоаудиту на прикладі електричного чайника, використовуючи дані<sup>11</sup>. Список компонентів електричного чайника з основними характеристиками наведено в таблиці 5.1. Для спрощення в таблиці показано лише частину складових.

Таблиця 5.1 Список основних складових електричного чайника.

Компонент	Матеріал	Технологічний процес	Маса, кг	Втілена енергія виробництва матеріалу, МДж/кг	Енергія оброблення матеріалу, МДж/кг
Корпус	Поліпропілен	Формування полімерів	0,86	94	8,6
Нагрівальний елемент	Ніхром	Деформівні процеси	0,026	130	2,6
Корпус нагрівального елемента	Нержавіюча сталь	Деформівні процеси	0,09	81	3,4
Термостат	Нікелевий сплав	Деформівні процеси	0,02	72	2,1
Теплоізоляція	Кераміка Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Пресування, спікання	0,03	52	27

<sup>11</sup> За матеріалами Michael F. Ashby. Materials and Sustainable Devepment. Elsevier. - 2016. – 312 p.

Заповнення відповідної форми інструменту екоаудиту показано на рисунках 5.6 – 5.7. Рисунок 5.6 – заповнення таблиці матеріалів, процесів та способу утилізації основних компонентів. Враховуються типові процеси для виготовлення виробів з вказаних матеріалів. Розділом 2 – Transport, продемонстровано, типовий на сьогоднішній день шлях доставки: перевезення морським транспортом з країни виробництва (для 90% виробів побутового призначення – Китай) до країни споживання – Україна. Другий етап транспортування від морського порту до системи роздрібної торгівлі – великоваговим автотранспортом.

**Product information** ?

Name: Чайник електричний

**Material, manufacture and end of life** ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Kettle body	PP (homopolymer, 40% glass and mineral)	Virgin (0%)	0,86	Polymer molding	Landfill
1	Heating element	Nickel-Cr-Fe alloy, NICHROME, annealed (res	Virgin (0%)	0,026	Wire drawing	Re-manufacture
1	Casing, heating element	Stainless steel, austenitic, AISI 216, wrought, i	Virgin (0%)	0,09	Forging	Recycle
1	Thermostat	Copper-sulfurous alloy, C14700, wrought, har	Virgin (0%)	0,02	Extrusion, foil rolling	Recycle
1	Internal insulation	Alumina (99)(cold pressed and sintered)	Virgin (0%)	0,03	Incl. in material value	Landfill

**Transport** ?

Name	Transport type	Distance (km)
Stage 1	Sea freight	8000
Stage 2	32 tonne truck	500

Рис. 5.6 Складові виробництва та транспортування

**Use** ?

Product life: 5 Years

Country of use: Europe

**Static mode**

☒ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 2 kW

Usage: 365 days per year

Usage: 0,1 hours per day

**Mobile mode**

☐ Product is part of or carried in

Fuel and mobility type: Diesel -

Usage: 0

Distance: 0

**Report** ?

Рис. 5.7 Складові використання

У розділі використання – Use вказуються звичайні для пристроїв такого типу режими використання. З метою візуалізації, в полі Usage вказано

достатньо занижений показник – 0,1 години використання в день. Щоденний досвід підказує, що прилад працює близько 0,5 години на день.

Після заповнення полів форми, система формує заключний звіт у вигляді гістограм (рис. 5.8 а, б).

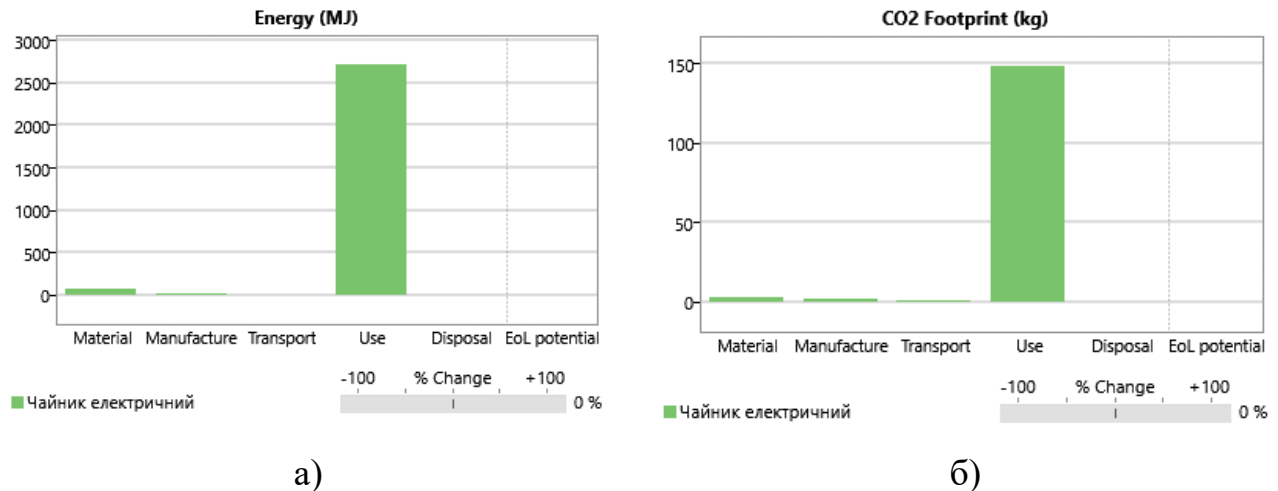


Рис. 5.8. Гістограми використання енергії (а) та викидів CO<sub>2</sub> (б) на різних етапах життєвого циклу електричного чайника.

Результати аналізу демонструють, що близько 99% використання енергії та продукування викидів карбонмісних газів відбувається на етапі використання пристрою. Такий результат чітко ілюструє сучасні підходи нормативних документів ЄС щодо підвищення енергоефективності побутових приладів та маркування класів енергоефективності на пакуваннях. Одержаний результат, також показує важливість ощадливого користування такими пристроями – зокрема відмову від нагрівання значних надлишків води.

### Контрольні запитання

1. Яка фаза життєвого циклу, на вашу думку, є найбільш енерговитратною (у розумінні витрат викопного палива) для наступних продуктів:

- Електричний тостер;
- Велосипед;
- Мотоцикл;
- Холодильник;
- Машина для приготування кави;
- Газовий обігрівач.

2. Чому переробка металевих матеріалів є більш поширеною, ніж переробка полімерів?
3. В чому полягає складність утилізації твердих сплавів WC-Co?

### Практичні завдання

1. Віконні рами виготовляють з екструдованого алюмінієвого профілю. Вважається, що заміна їх на екструдований PVC (повінілхлорид) може виявитись більш дружньою до навколишнього середовища з точки зору зменшення втіленої енергії виробництва. Використовуючи таблицю визначте, чи справедливе таке твердження якщо розміри профілів однакові і виготовлені з сирих матеріалів (без використання сировини від утилізації). Оцініть співвідношення між одержаними значеннями

Матеріал	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Втілена енергія, МДж/кг
Алюміній	2700	210
PVC	1440	82

2. Якщо в умовах задачі 1 врахувати, що екструдований алюміній на 100% одержують шляхом переробки утилізованих виробів і втілена енергія його виробництва складає 26 МДж/кг, а полівінілхлорид можна одержати лише з сирих матеріалів, то як зміниться кращий вибір матеріалу. Оцініть співвідношення.
3. Використовуючи CES Edupack Level 2 побудувати однопараметричний графік – bar chart відношення викидів CO<sub>2</sub> до втіленої енергії первинного виробництва. Визначити: який з матеріалів має найвище значення показника, пояснити чому.
4. Для схеми навантаження 2.10, відомої сили 40 кН та довжини балки 0,5 м, в графічному режимі визначте матеріал (не беручи до уваги природні матеріали), який забезпечить мінімальне використання енергії при виготовленні балки. Чи зміниться вибір оптимального матеріалу, якщо в якості критерію застосувати мінімальну кількість води використаної води.
5. Використовуючи CES Edupack Level 2, для вибору «метали та сплави» побудувати двокоординатний графік: вісь X – витрати енергії на лиття, вісь Y – витрати енергії на формування порошків. Визначити метали з найбільшим та найменшим відношенням наведених показників.

## Перелік використаної літератури

1. Michael Ashby, Hugh Shercliff, David Cebon. Materials. Engineering, Science, Processing and Design. Elsevier; 2007. - 514 p.
2. Michael Ashby. Materials Selection in Mechanical Design. Elsevier; 2011. - 646 p.
3. Степанов О.В., Богомол Ю.І. Програмні засоби оптимального вибору матеріалів//Металознавство та обробка металів.-2016. - № 4. С. 56-60.
4. David R.H. Jones, Michael F. Ashby. Engineering materials 1. An Introduction to Properties, Applications and Design. Elsevier. - 2019. – 564 p.
5. Michael F. Ashby. Materials and Sustainable Devepment. Elsevier. - 2016. – 312 p.
6. Michael F. Ashby. Materials and Environment. Eco-informed material choice. Elsevier. - 2013. – 616p.
7. Unit 8. Objectives in conflict: trade off methods and penalty functions, Ashby M. F., Department of Engineering University of Cambridge. [Презентація], [web-доступ: <http://teachingresources.grantadesign.com/Presentations/PPTOBJEN16>]

## Додаток 1.

### Повний список властивостей матеріалів (англійсько – український відповідник)

Група властивостей / властивість (англійською)	Переклад українською	Вид даних, одиниці вимірювання
<b><i>Composition overview</i></b>	<b><i>Склад оглядово</i></b>	
Base	Основа	Вибір з переліку хімічних елементів або сполук.
Polymer class	Клас полімеру	Вибір з переліку класів
Polymer type	Тип полімеру	Вибір з переліку типів: ABS, BMI, PA+PP, тощо.
Polymer type full name	Повна назва типу полімеру	Вибір з переліку повних назв
% filler (by weight)	Вміст наповнювача в % мас.	Верхня та нижня межа вмісту наповнювача
Filler type	Тип наповнювача	Вибір з переліку типів волокон, лусок, порошоків
Wood type	Тип деревини	Вибір з переліку
Renewable content	Поновлюваний склад, %	Верхня та нижня межа вмісту компонентів, які можуть поновлюватись
<b><i>Composition detail (metals, ceramics and glasses)</i></b>	<b><i>Детальний склад (метали, кераміка, скло)</i></b>	
В розділі подається детальний склад матеріалу у відсотках. Можливі компоненти - хімічні елементи, окремі оксиди, нітриди, бори́ди, карбіди, інші сполуки		
<b><i>Composition detail (polymers and natural materials)</i></b>	<b><i>Детальний склад (полімери, природні матеріали)</i></b>	
В розділі подається детальний склад матеріалу та наповнювача для гідридних матеріалів.		
<b><i>Price</i></b>	<b><i>Ціна</i></b>	
Price	Ціна	Мінімальна та максимальна ціна матеріалу в USD/kg
<b><i>Physical properties</i></b>	<b><i>Фізичні властивості</i></b>	
Density	Густина	kg/m <sup>3</sup>
Relative density	Відносна густина	Відношення густини до густини води, відн. од.
Porosity (closed)	Закрита пористість	у %
Porosity (open)	Відкрита пористість	у %
Cell size	Розмір комірки (пори)	mm
Cells / volume	Кількість комірок в одиниці об'єму	mm <sup>-3</sup>
Anisotropy ratio	Коефіцієнт анізотропії	
<b><i>Mechanical properties</i></b>	<b><i>Механічні властивості</i></b>	
Young's modulus	Модуль Юнга	GPa
Yield strength (elastic limit)	Межа плинності	MPa



Tensile strength	Межа міцності (на розрив)	МПа
Tensile stress at 100% strain	Напруження при деформації (розтягнення) 100%	МПа Характеристика, для еластомерів та подібних
Tensile stress at 300% strain	Напруження при деформації (розтягнення) 300%	
Elongation	Відносне видовження	% деформації
Elongation at yield	Видовження на межі плинності	% деформації
Compressive modulus	Модуль при стисканні	ГПа, характеристика для еластомерів
Compressive strength	Міцність пр стисканні	МПа, характеристика визначається для пін та подібних при 25% та 50% деформації
Flexural modulus	Модуль згину	ГПа
Flexural strength (modulus of rupture)	Межа міцності при згині	МПа
Shear modulus	Модуль зсуву	ГПа
Shear strength	Межа міцності при зсуві	МПа
Bulk modulus	Модуль всебічного стиснення	ГПа
Poisson's ratio	Коефіцієнт Пуасона	
Shape factor	Фактор форми	Величина, що характеризує максимальне співвідношення сторін профілю, яке не викликає самовільної пластичної деформації. Для металів в від 1 до 66
Hardness - Vickers	Твердість за Вікерсом	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	Втомна міцність при 10 <sup>7</sup> циклів навантаження	МПа
Mechanical loss coefficient (tan delta)	Коефіцієнт механічних втрат	
<b>Impact &amp; fracture properties</b>	<b>Властивості руйнування</b>	
Fracture toughness	Тріщиностійкість	МПа.м <sup>0.5</sup>
<b>Thermal properties</b>	<b>Температурні властивості</b>	
Melting point	Температура плавлення	°C
Glass Temperature	Температура склування	°C
Maximum service temperature	Максимальна робоча температура	°C
Minimum service temperature	Мінімальна робоча температура	°C
Thermal conductivity	Теплопровідність	W/m.°C
Specific heat capacity	Питома теплоємність	J/kg. °C
Thermal expansion coefficient	Коефіцієнт термічного розширення	μstrain/°C
Latent heat of fusion	Прихована теплота плавлення	кДж / кг
Glass temperatupe	Температура склування	°C
Heat deflection temperature	Температура втрати жорсткості (для термопластів)	°C
<b>Electrical properties</b>	<b>Електричні властивості</b>	
Electrical resistivity	Питомий електроопір	μohm.cm
Dielectric constant (relative	Відносна діелектрична	

permittivity)	проникність	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	Тангенс діелектричних втрат	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	Діелектрична міцність	MV/m
Temperature dependence of resistivity	Температурна залежність електроопору	/ °C
Galvanic potencial	Гальванічний потенціал	V
<b>Magnetic properties</b>	<b>Магнітні властивості</b>	
Magnetic type	Магнітна поведінка	Non-magnetic – немагнітний Magnetic – магнітний (магніто-м'який, елемент електромагніта, тощо) Permanent magnet – магнітно-твердий, постійний магніт
Remanent induction Br	Залишкова індукція	Тл
Saturation induction Bs	Індукція насичення	Тл
Coercitive force Hc	Коерцетивна сила	A/м
Maximum permeability	Максимальна проникність	
Curie temperature	Температура Кюрі	°C
<b>Optical properties</b>	<b>Оптичні властивості</b>	
Refractiv index	Показник заломлення	
Transparency	Прозорість	Відносна шкала з величинами: opaque непрозорий translucent напівпрозорий transparent прозорий optical quality оптично чистий
<b>Processing properties</b>	<b>Технологічні властивості</b>	
Metal casting	Литво металів	Для усіх перерахованих технологічних операцій формоутворення використовується відносна шкала зі значеннями: Unsuitable - непридатний Limited use - обмежено придатний Acceptable - придатний Excellent - високо придатний
Metal cold forming	Холодна обробка металів (прокатка, волочіння)	
Metal hot forming	Гаряча обробка металів (прокатка, волочіння)	
Metall press forming	Штампування металів	
Metall deep drawing	Глибока витяжка металів	
Polymer injection molding	Інжекційне формування полімерів	
Polymer extrusion	Екструзія полімерів	
Polymer thermoforming	Термоформування полімерів	
<b>Durability</b>	<b>Стійкість, довговічність</b>	
Water (fresh)	У прісній воді	Застосовується відносна шкала  Unacceptable - непридатний, Limited use – обмежено придатний, Acceptable - придатний, Excellent – високо придатний
Water (salt)	У солоній воді	
Weak acids	У слабких кислотах	
Strong acids	У сильних кислотах	
Weak alkalis	У слабких лугах	
Strong alkalis	У сильних лугах	
Organic solvents	В органічних розчинниках	
Oxidation at 500C	Окислення при 500°C	
UV radiation (sunlight)	Ультрафіолетовому	

	випромінюванню (сонячне світло)	Poor – погана стійкість, деградація через дні/тижні, Fair - посередня стійкість (місяці/роки), Good – добра стійкість (роки), Excellent – відмінна стійкість (десятки років)
Flammability	Займистість	Highly flammable, Slow-burning, Self-extinguishing, Non-flammable
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>	<b>Енергія, викиди CO<sub>2</sub> та використання води первинного одержання</b>	
Embodied energy, primary production	Втілена енергія	МДж/кг
CO2 footprint, primary production	Виділення CO <sub>2</sub>	кг/кг
Water usage	Використання води	літр/кг
<b>Processing energy, CO2 and water</b>	<b>Енергія, викиди CO<sub>2</sub> та використання води технологічних процесів</b>	
<i>Ті ж види екологічних індексів, що для первинного одержання зстосовані для різних груп технологічних процесів. Переклад груп технологічних процесів в додатку 2.</i>		
<b>Recycling and end of life</b>	<b>Переробка та утилізація</b>	
Recycle	Переробка	Доступність переробки Так / Ні
Embodied energy, recycling	Втілена енергія переробки	МДж/кг
CO2 footprint, recycling	Викиди CO <sub>2</sub> при переробці	кг/кг
Recycle fraction in current supply	Доля переробленого в сучасних виробничих схемах	%
Downcycle	Переробка в матеріали нижчої продуктової групи	Доступність переробки Так / Ні
Combust for energy recovery	Спалювання для одержання енергії	Доступність переробки Так / Ні
Landfill	Захоронення	Доступність переробки Так / Ні
Biodegrade	Біодеградуєчий матеріал	Так / Ні

**Додаток 2.****Список технологічних процесів (англійсько – український )**

<i>Назва технологічного процесу (групи процесів) (англійською)</i>	<i>Назва технологічного процесу (групи процесів) (українською)</i>
<b>Shaping</b>	<b>Формоутворення</b>
<i>Additive manufacturing</i>	<i>Адитивне виробництво</i>
3D ceramic-mold prototyping	2-вимірне прототипування кераміки
3D printing	3-вимірний друк
Binder printing	Друк зв'язуючою речовиною
Ballistic particle (obsolete)	Балістичне нанесення часток (застарілий)
Fused deposition	Осадження розплаву
Laser powder forming	Лазерне формування порошків
Mask projection stereolithography	Трафаретна проекційна стереолітографія
Stereolithography	Стереолітографія
Electron beam melting	Електроннопроменеве оплавлення
Selective laser melting	Селективне лазерне оплавлення
Selective laser sintering, metals and ceramics	Селективне лазерне спікання металів та кераміки
Selective laser sintering, polymers	Селективне лазерне спікання полімерів
Solid ground curing (obsolete)	Трафаретне нанесення фотополімерів
Laminated object manufacture	Виробництво пошаровим ламінуванням
Ultrasonic consolidation	Ультразвукове зварювання фольг
<i>Casting</i>	<i>Лиття</i>
Centrifugal-aided	Центрифугування
Semi-centrifugal	Відцентрове з вертикальною віссю
Standard (Centrifugal)	Відцентрове з горизонтальною віссю
Ferro die	Лиття під тиском з холодною камерою пресування
Gravity die	Лиття в кокіль
High pressure die	Лиття під високим тиском
Low pressure die	Лиття під низьким регульованим тиском
Reocasting	Рідка штамповка
Thixocasting	Рідка штамповка

Squeeze	Лиття видавлюванням
CLA/CLV (Investment)	Лиття за моделями, що витоплюються
Replicat (Investment)	Лиття за моделями, що газифікуються
Standard Automated (Investment)	Автоматичне лиття за моделями, що газифікуються
Standard Manual (Investment)	Ручне лиття за моделями, що газифікуються
Vacuum investment casting	Вакуумне лиття за моделями, що газифікуються
Rammed graphite casting	Лиття в разову графітову форму
Ceramic mold	Лиття у відпалену керамічну форму
CO2/silicate	Лиття в піщану форму на рідкому склі
Cosworth	Алюмінієве лиття за технологією Cosworth
Evaporative pattern automated	Лиття в піщану форму за моделлю, що газифікується
Evaporative pattern manual	
Green sand automated	Лиття в сиру піщану форму
Green sand manual	
Plaster mold	Лиття в гіпсову форму
Shell	Лиття за технологією Croning Shell process
<b><i>Composite forming</i></b>	<b><i>Формування композитів</i></b>
Automatic tape placement	Автоматичне настелювання стрічок
Filament winding	Намотка волокон
BMC molding	Формування композиційних сумішей
Cold press molding	Формування холодним пресуванням
SMC molding	Формування з листових композитів
Thermoplastic composite molding	Гаряче формування термопластичних композитів
Continuous lamination	Неперервне ламінування
Pultrusion (continuous)	Неперервна пультрузія (прокатування)
Autoclave molding	Автоклавне формування
Hand lay-up	Ручне вистелювання
Vacuum/pressure bag	Формування вакуумним /напірним мішком
Resin film infusion	Інфузія шарів смоли
Resin transfer molding	Пряме формування смоли
Vacuum assisted rtm	Формування смоли вакуумом
Centrifugal molding	Відцентрове формування

Spray-up	Нанесення шарів
<b><i>Deformation</i></b>	<b><i>Деформаційні методи</i></b>
Shape drawing	Фасонне протягування
Wire drawing	Волочіння дроту
Ceramic extrusion	Екструзія кераміки
Hot metal extrusion	Гаряча екструзія металу
Impact extrusion	Ударна екструзія
Cold closed die forging	Холодна ковка в закритій формі
Cold heading and upsetting	Холодна висадка
Cold shape rolling	Холодна фасонна прокатка
Hot closed die forging	Гаряча ковка в закритій формі
Hot open die forging	Гаряча ковка у відкритій формі
Hot shape rolling	Гаряча фасонна прокатка
Swaging	Радіальна ковка
Sheet deep drawing	Глибока витяжка листа
Sheet electromagnetic forming	Електромагнітне формування листа
Sheet explosive forming	Вибухове формування листа
Sheet micro-blanking	Мікровирубка з листа
Sheet press forming	Пресове формування листа
Sheet roll forming	Фасонна прокатка листа
Sheet Spinning	Кругове видавлювання листа
Sheet Stamping	Штампування з листа
Sheet superplastic forming	Суперпластичне формування листа
<b><i>Deposition</i></b>	<b><i>Нанесення покриттів</i></b>
CVD (chemical vapor deposition)	Хімічне осадження з парової фази
Large-scale electroforming	Крупне електролітичне нанесення
Micro electroforming	Мікро електролітичне нанесення
Small-scale electroforming	Дрібне електролітичне нанесення
<b><i>Machining</i></b>	<b><i>Механічне оброблення</i></b>
Abrasive jet machining	Абразивно струминне оброблення
Abrasive water jet cutting	Водно-абразивне різання
Centreless grinding	Безцентрове шліфування
Grinding	Шліфування
Ultrasonic machining	Ультразвукове оброблення

Water jet cutting	Різання струменем води
Chemical machining	Хімічне оброблення
Electrical discharge wire cutting	Електроіскрове різання дротом
Electro-chemical machining	Електро-хімічне оброблення
Electro-discharge machining	Електророзрядне оброблення
Band saw	Різання стрічковою пилою
Broaching	Протягування
Circular saw	Різання циркулярною пилою
Drilling	Свердління
Micromachining	Мікро оброблення
Milling	Фрезерування
Planing/shaping/slotting	Стругання / прорізання
Reaming	Розвертування
Turning, boring and parting	Токарні види оброблення
Cropping/guillotine (sheet)	Різання листа
Punching, perforating, blanking, nibbling	Вирубка, перфорування
Electron beam machining	Електроннопроменеве оброблення
Hot wire cutting	Різання гарячим дротом
Laser cutting	Лазерне різання
Laser machining	Лазерне оброблення
Oxyfuel gas cutting	Газополум'яне різання
Plasma arc cutting	Плазмодугове різання
<b><i>Molding</i></b>	<b><i>Формування (полімерів)</i></b>
Blow extrusion	Екструзія тиском
Blow glass	Видування скла
Blow injection	Екструзія тиском
Calendering	Каландрування – безперервне формування листа
Compression	Видавлювання у формі
Expanded foam molding	Формування пластиків з розширенням
Reaction injection	Реакційна інжекція
Thermoplastic injection	Формування термопластів у формі
Thermosets injection	Формування термосетів у формі
Polymer casting	Лиття полімерів
Polymer extrusion	Екструзія полімерів
Polymer forging	Штампування полімерів
Precision glass molding	Точне формування скла
Rotational	Обертове формування у закритій формі

Thermoforming	Термопластичне формування
Transfer molding	Формування видавлюванням
<b><i>Powder methods</i></b>	<b><i>Порошкові методи</i></b>
Die pressing and sintering	Холодне пресування та спікання
Isostatic pressing	Ізостатичне пресування
Powder injection molding	Інжекційне формування порошків з термопластичною зв'язкою
Powder metal forging	Порошкове штампування
Powder rolling	Прокатка порошків
Repressing	Допресовка
Slip casting	Лиття порошкових сумішей в гіпсову форму
Tape casting	Лиття порошкових стрічок
Hipping	Гаряче ізостатичне пресування
Hot pressing	Гаряче пресування
Powder extrusion	Гаряча екструзія порошків
Pressureless sintering	Спікання вільнонасипаного порошку
Spark sintering	Іскрове спікання
Spray deposition	Струменеве нанесення
<b>Joining</b>	<b>З'єднання</b>
<b><i>Adhesives Flexible</i></b>	<b><i>Пластичне склеювання</i></b>
Neopren	Неопренове
Nitrile	Нітрилове
Polyurethane	Поліуретанове
Silicones	Силіконове
<b><i>Adhesives Rigid</i></b>	<b><i>Жорстке склеювання</i></b>
Acrylic	Акрилове
Anaerobic	Анаеробне
Cyanoacrylates	Цианоакрилове (Супер клей)
Epoxy	Епоксидне
Inorganic	Неорганічне
Phenolic	Фенольне (на основі фенольних смол)
Polyester	Поліестерне
Polysulfide	Полісульфідне
Solvent bonding	Розчинниками
<b><i>Fasteners</i></b>	<b><i>Скріплення</i></b>
Stapling	Скобами



Rivet	Заклепками
Nut and bolt	Різьбове (болтами та гайками)
Sewing	Сшивання
Press fit	Пресова посадка
Snap fit	Фасонним скобами
<b><i>Mechanical welding</i></b>	<b><i>Механічне зварювання</i></b>
Explosive welding	Зварювання вибухом
Friction welding	Зварювання тертям
Friction-stir welding	Зварювання зовнішнім тертям
Ultrasonic welding	Ультразвукове зварювання
<b><i>Thermal welding</i></b>	<b><i>Термічне зварювання</i></b>
Diffusion bonding (ceramics)	Дифузійне зварювання кераміки
Arc spot - MIG	Дугове зварювання плавким електродом
Arc spot - TIG	Дугове зварювання неплавким електродом
Brasing	Газове паяння
Diffusion bonding (metals)	Дифузійне зварювання металів
Electron beam	Електронно-променеве зварювання
Gas metal arc (MIG)	Газодугове зварювання плавким електродом
Gas tungsten arc (TIG)	Газодугове зварювання неплавким електродом
Laser beam	Лазерне зварювання
Manual metal arc (MMA)	Ручне електрозварювання плавким електродом
Oxyacetylene	Газозварювання (ацетиленове)
Plasma arc	Плазмове зварювання
Flash welding	Флеш-зварювання
Projection welding	Контактне зварювання
Seam welding	Контактне зварювання з прокатуванням
Spot welding	Точкове зварювання
Soldering	Низькотемпературне паяння або холодне зварювання
Submerged arc	Дугове зварювання під флюсом
Thermit welding	Термітне зварювання
Polymers dielectric and microwave welding	Мікрохвильове зварювання полімерів
Polymers hot bar and impulse welding	Імпульсне зварювання полімерів
Polymer hot gas welding	Зварювання полімерів гарячим газом
Polymer hot plate welding	Зварювання полімерів гарячою пластиною
Polymer infrared welding	Інфрачервоне зварювання полімерів
Laser welding of thermoplastics	Лазерне зварювання термопластів

Polymer induction welding	Індукційне зварювання полімерів
Resistive implant welding	Резистивне зварювання з імплантом
<b>Surface treatment</b>	<b>Обробка поверхні</b>
<b><i>Heat treatment and ion implantation</i></b>	<b><i>Термічне оброблення та йонна імплантація</i></b>
Aluminizing	Алюмінування
Boriding	Борування
Carburizing and carbonitriding	Цементация та нітроцементация
Chromizing and plasma chromizing	Хромування та плазмове хромування
Induction and flame hardening	Індукційне та полум'яне зміцнення
Ion implantation	Йонна імплантація
Laser hardening	Лазерне зміцнення
Nitriding	Азотування
Sherardizing and sheraplexing	Дифузійне цинкування
<b><i>Painting and printing</i></b>	<b><i>Фарбування та принтинг</i></b>
Cubic printing	Гідрографія, заглибний друк
Electrophoretic and autophoretic painting	Електрофоретичний та автофоретичний друк
Hot stamping	Гаряче тиснення
In-mold decoration (IMD)	Внутрішньоформове декорування
Organic solvent-based painting	Фарбування фарбами на органічній основі
Pad printing	Тамподрук
Silk screen printing	Трафаретний друк
Vitrous enameling	Склоподібне емалювання
Water-based painting	Фарбування фарбами на водній основі
<b><i>Polishing / etching / working / texturing</i></b>	<b><i>Полірування, гравірування, текстурування</i></b>
Abrasive blasting	Обдувка абразивом
Chemical polishing	Хімічне полірування
Electropolishing	Електрополірування
Etching	Травлення
Grinding	Шліфування
Mechanical polishing and burnishing	Механічне полірування і припікання
Micropolishing	Мікрополірування
Shot peening and laser peening	Дробоструминне оброблення та лазерне пінування
Texturing	Текстурування

<i><b>Surface coating</b></i>	<i><b>Поверхневі покриття</b></i>
Anodizing	Анодування
Chromating and phosphating	Хромування та фосфатування
Laser / plasma cladding	Лазерне / плазмове плакування
Roll / explosive cladding	Обкатування
Electroless (autocatalyst) plating	Самовільне електролітичне осадження
Electro-plating	Електролітичне покриття
Hot-dip coatings	Покриття занурюванням
Immersion plating	
Polymer electrostatic spray	Електростатичне нанесення полімерів
Polymer flame spraing	Газополум'яне нанесення полімерів
Polymer fluidized-bed coating	Нанесення полімерів з засипки, що кипить
Electric wire arc spraying	Електродугове напилення з дроту
Flame spraing	Газополуменеве напилення
Plasma-arc spraying	Плазмове напилення
Powder spraing	Порошкове напилення
CVD processing	Хімічне осадження з парогазової фази
PVD plating	Фізичне осадження з парової фази
PVD sputtering	